

Universidad Carlos III de Madrid



**DESCARGAS PARCIALES EN LOS
AISLAMIENTOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS
DE LOS TRANSFORMADORES**

Grado en Ingeniería Eléctrica

Autor: Juan Sánchez López-Bravo.

NIA: 10080064

Tutor: María Belén García de Burgos.

Leganés, Marzo de 2014

Marzo de 2014

Marzo de 2014

AGRADECIMIENTOS

Con la realización del proyecto se acaba una época de mi vida que ha estado llena de alegrías en la mayoría de los casos, y de algún que otro disgusto. Estos años de universidad han sido de los mejores.

En primer lugar le quería agradecer a Belén la oportunidad que me ha dado llevándome el trabajo fin de grado. Gracias por su apoyo y ayuda ya que sin ella no hubiera sido posible.

Agradecer de una forma especial a mis padres todos sus consejos y ayuda no solo durante la época de universidad si no durante toda mi vida, la paciencia que en muchas ocasiones han tenido que tener. Ha habido muchos momentos de voces y disgustos, pero han merecido la pena con la finalización de todo.

No quiero dejar pasar la oportunidad de agradecerle a mis hermanos todo lo que han hecho por mí. Gracias por vuestros ánimos y vuestra confianza siempre. Gracias por haber ayudado tanto siempre que os lo he pedido, y aunque no lo haya hecho. Gracias por abrir el camino.

Gracias a todos los compañeros y en especial a los de siempre, con lo que he estado día a día en la universidad, estudiando duro y perdiendo el tiempo jugando al mus, pocha o en las tiendas de ilusión, porque no son simples compañeros, si no amigos, Checa, Chema, Irene, Álvaro, Julio, Desi, Jorge, María...

Gracias a toda la familia que siempre ha estado pendiente de mí, a mis abuelos, los que están y los que desgraciadamente ya se han ido. Gracias también de una forma especial a Vicente, ya que es uno más de la familia.

Gracias a los amigos de siempre, de Borox, ya que siempre me han mostrado su apoyo y confianza. Y gracias a toda esa gente que no es fácil de cuadrar en un mismo grupo, Ely, el pequeño nano...

Por último, y no por ello menos importante, le quiero dar las gracias, a la que ha sido mi mejor compañera de viaje durante este tiempo, la que me ha aguantado cuando venían las malas noticias, la que se ha alegrado a mi lado con los éxitos, la que me ha aguantado en todo momento. Gracias Patricia de verdad, mil gracias por todo lo que has hecho por mí, por ayudarme, sonreírme cada mañana, y sobre todo por estar a mi lado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Resumen	8
1.2. Planificación del Trabajo.....	9
2. EL FENÓMENO DE LAS DESCARGAS PARCIALES.....	10
2.1. Tipos de Descargas Parciales.....	11
2.1.1. Descargas Parciales Internas.	11
2.1.2. Descargas Parciales de efecto Corona.	12
2.1.3. Descargas Parciales Superficiales.	12
2.2. Análisis cuantitativo de las Descargas parciales.	13
2.3. Análisis cualitativo de las Descargas Parciales.	14
2.3.1. Magnitud de la Intensidad	14
2.3.2. Frecuencia y Ángulo de Fase.	15
3. AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE EN TRANSFORMADORES.	16
3.1. Aislamiento sólido.....	16
3.1.1. Tipos de aislantes sólidos.....	16
3.1.2. Papel-aceite como material aislante.	17
3.2. Aislamientos Líquidos.....	17
3.2.1. Aceite Mineral.....	18
C. Factores que deterioran el aceite [19]:.....	20
3.2.2. Fluidos Alternativos al Aceite mineral.....	21
3.3. Mantenimiento en Transformadores.	23
4. DPS EN AISLAMIENTOS DE TRANSFORMADORES.	27
4.1. Normativa relacionada con las DP's en transformadores.	27
4.2. Patrones de Descargas Parciales en Transformadores.....	27
4.3. Pruebas que debe de pasar un transformador nuevo.....	28
4.4. Estudios experimentales sobre DP's en aislamientos sólido.....	28
4.4.1. Simulación de distintos efectos que provocan DP's	29
4.4.2. Efecto de las DP's en la capacidad de soportar sobretensiones.	30
4.4.3. Ensayo de Pressboard sometido a altas temperaturas.....	36
4.5. Ensayos de DP's sobre aislantes líquidos	39
4.5.1. Descargas Parciales en Aceite de Palma.	42
4.5.2. Descargas Parciales en Esteres.....	45
5. MEDIDA DE LAS DESCARGAS PARCIALES.	46
5.1. Técnicas de Medida Eléctricas.	47
5.2. Técnicas de Medida No Eléctrica.	48
5.3. Ejemplos de Técnicas de Medida	49
5.3.1. Técnica de medida UHF.....	49
5.3.2. Técnica de medida acústica.....	54
5.3.3. Técnica de medida ICT	54

Marzo de 2014

5.4. Medida de DP en campo	56
5.5. Interpretación y clasificación	57
5.5.1. Redes Neuronales.....	59
6. CONCLUSIONES.....	60
7. BIBLIOGRAFÍA.....	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Descarga parcial Interna. Tomada de [1].</i>	11
<i>Ilustración 2: Patrón de Descarga Parcial Interna. Tomada de [1].</i>	12
<i>Ilustración 3: Patrón de Descarga Parcial efecto Corona. Tomada de [2].</i>	12
<i>Ilustración 4: Patrón de Descarga Parcial superficial. Tomada de [2].</i>	13
<i>Ilustración 5: Función de distribución de probabilidad (izquierda), y densidad de probabilidad (derecha). Tomada de [2].</i>	13
<i>Ilustración 6: Tipo de respuesta para banda ancha (α) y banda estrecha (β). Tomada de [13].</i>	14
<i>Ilustración 7: Evolución de la rigidez dieléctrica con respecto a la humedad. Tomada de [19].</i>	17
<i>Ilustración 8: Aceites parafínicos. Tomada de [19].</i>	19
<i>Ilustración 9: Aceites Nafténicos. Tomada de [19].</i>	19
<i>Ilustración 10: Aceites Aromáticos. Tomada de [19].</i>	19
<i>Ilustración 11: Saturación para cada tipo de aceite con respecto a la temperatura. Tomada de [27].</i>	21
<i>Ilustración 12: Ejemplo de síntesis del éster.</i>	22
<i>Ilustración 13: Circuito para realizar el ensayo de vacío. Tomada de [17].</i>	24
<i>Ilustración 14: : Circuito para realizar el ensayo de cortocircuito. Tomada de [17].</i>	24
<i>Ilustración 15: Ejemplo de ensayo en frecuencia.</i>	25
<i>Ilustración 16: Ejemplo de espectro de polarización.</i>	26
<i>Ilustración 17: Varios ejemplos sobre modelos de DP.</i>	28
<i>Ilustración 18: Configuración de electrodos. Tomada de [12].</i>	29
<i>Ilustración 19: Diferentes posiciones de la partícula. Tomada de [12].</i>	30
<i>Ilustración 20: Vista interna del transformador. Tomada de [20].</i>	30
<i>Ilustración 21: Configuración del ensayo: punta-plano. Tomada de [20].</i>	31
<i>Ilustración 22: Comparación del campo eléctrico producido para diferentes configuraciones Tomada de [26].</i>	31
<i>Ilustración 23: Configuración para ensayo tipo rayo. Tomada de [20].</i>	33
<i>Ilustración 24: Relación voltaje-patrón de superficie decolorada. Tomada de [20].</i>	33
<i>Ilustración 25: Evolución en el tiempo de la tensión tipo rayo. Tomada de [20].</i>	34
<i>Ilustración 26: Tensión tipo rayo cuando se produce ruptura. Tomada de [20].</i>	34
<i>Ilustración 27: Circuito de medida y toma de resultados. Tomada de [21].</i>	37
<i>Ilustración 28: Magnitud de descarga parcial en el aumento de temperatura. Tomada de [21].</i>	37
<i>Ilustración 29: DP producidas a 81 °C. Tomada de [21].</i>	37
<i>Ilustración 30: DP producidas a 70 °C. Tomada de [21].</i>	37
<i>Ilustración 31: DP producidas a 80 °C. Tomada de [21].</i>	38
<i>Ilustración 32: DP producidas a 60 °C. Tomada de [21].</i>	38
<i>Ilustración 33: DP producidas a 70 °C. Tomada de [21].</i>	38
<i>Ilustración 34: Tensión aplicada de 6,8 kV. Tomada de [23].</i>	41
<i>Ilustración 35: Tensión aplicada de 7 kV. Tomada de [23].</i>	41
<i>Ilustración 36: Tensión aplicada de 8 kV. Tomada de [23].</i>	41
<i>Ilustración 37: Tensión aplicada de 7 kV. Tomada de [23].</i>	41
<i>Ilustración 38: Tensión aplicada de 8,5 kV. Tomada de [23].</i>	41
<i>Ilustración 39: Configuración punta-plano. Tomada de [30].</i>	42
<i>Ilustración 40: DP en aceite de palma para una tensión aplicada de 25 kV. Tomada de [26].</i>	43
<i>Ilustración 41: DP en aceite de palma para una tensión aplicada de 18 kV. Tomada de [26].</i>	43
<i>Ilustración 42: DP en aceite de palma para una tensión aplicada de 32 kV. Tomada de [26].</i>	43
<i>Ilustración 43: DP en aceite mineral para una tensión aplicada de 25 kV. Tomada de [26].</i>	44
<i>Ilustración 44: DP en aceite mineral para una tensión aplicada de 20 kV. Tomada de [26].</i>	44
<i>Ilustración 45: DP en aceite mineral para una tensión aplicada de 30 kV. Tomada de [26].</i>	44
<i>Ilustración 46: Ejemplo de la configuración para el experimento. Tomada de [24].</i>	45
<i>Ilustración 47: Método de detección de DP.</i>	46

<i>Ilustración 48: Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el condensador de acoplamiento. Circuito Indirecto de detección. Tomada de [2]</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 49: Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el objeto de ensayo Circuito Directo de detección. . Tomada de [2].....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 50: Esquema de circuito equilibrado (Puente equilibrado). Tomada de [2]</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 51: Detector acústico de medida de ultrasonidos</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 52: Ventana dieléctrica en la tapa de la escotilla de un transformador. b) Sensor de UHF con un amplificador montado en la ventana dieléctrica del transformador.</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 53: Transformador (IMVA) con abertura en la parte superior. Las áreas blancas del círculo indican los lugares donde los sensores UHF se encuentran. Tomada de [31]</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 54: Modelo de descarga interna. Tomada de [31]</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 55: resultado del experimento para cada una de las tensiones. Tomada de [31].....</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 56: Experimento de descarga superficial. Tomada de [31].....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 57: Patrones de DP. Tomada de [31]</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 58: Configuración para simular DP de efecto corona. Tomada de [31].....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 59: Resultados para la prueba de DP de efecto corona. Tomada de [31].....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 60: Circuito para la detección de DP con la técnica acústica.....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 61: Composición de los equipos utilizados. Tomada de [28]</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 62: Resultados obtenidos para ITC. . Tomada de [28]</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 63: a) Descarga máxima en cada fase ($H_{qmax}(\varphi)$). b) Descarga media en cada fase ($H_{mean}(\varphi)$). c) Número de descargas en cada fase ($H_n(\varphi)$) . Tomada de [12]</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 64: Ejemplo de gráfica 3-D. Tomada de [12].....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 65: Patrones de DPs. Tomada de [12].</i>	<i>58</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Composición del Aceite Mineral.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2: Composición de los aceites vegetales.</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3: Propiedades de las siliconas.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4: Resultados de la tensión de ruptura.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 5: Resultados para el aceite mineral.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6: Resultados para el aceite de colza.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 7: Resultados para el aceite de colza modificado.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 8: Propiedades del aceite de palma.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 9: Tipos de aceites estudiados.....</i>	<i>59</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Resumen

El transformador es uno de los principales activos del sistema eléctrico debido a su importante funcionalidad y su elevado coste.

El objetivo del trabajo es hacer una recopilación bibliográfica sobre el fenómeno de las descargas parciales en los transformadores.

El documento está estructurado en 6 capítulos. En el segundo capítulo se habla de forma general de las descargas parciales, y de los fenómenos que las pueden causar. También se describen los tres principales grupos de descargas parciales que se pueden dar.

En el capítulo 3 se habla del aislamiento del transformador. Se describen el aislamiento tanto sólido como líquido, y se dan sus principales características.

En el capítulo 4 se habla sobre cómo el fenómeno de las descargas parciales afecta al aislamiento de los transformadores, los motivos por los que aparecen y otros aspectos relacionados, incluyendo una relación de la normativa aplicable. En este capítulo se incluye la descripción de los principales estudios experimentales y teóricos que han aparecido en los últimos años sobre descargas parciales en aislamientos sólidos y líquidos del transformador.

Por último, en el capítulo 5 se describen las diferentes técnicas de medida de descargas parciales empleadas en la actualidad. Como se verá, hay dos tipos de medidas: eléctricas y no eléctricas, que están detalladas en la norma UNE-60270.

Se debe añadir que aunque la matriz de evaluación incluye un punto llamado “Presupuesto”, en este caso no es de aplicación, ya que se trata de un proyecto teórico. El acceso a toda la información recogida ha sido gratuito y se ha hecho a través de la biblioteca de la Universidad Carlos III de Madrid.

1.2. Planificación del Trabajo.

La realización del proyecto se ha realizado siguiendo los siguientes pasos:

1. Recopilación de toda la bibliografía necesaria para desarrollar cada uno de los capítulos del proyecto.
2. Comprensión de conceptos acerca de las descargas parciales.
3. Con ayuda de la tutora, se fijan los objetivos que persigue el proyecto.
4. Investigación sobre las descargas parciales en cada uno de los tipos de aislamientos del transformador.
5. Investigación de las técnicas de medida de las descargas parciales.
6. Conocimiento de los daños causados en el aislante tras el efecto de las descargas parciales.
7. Redacción del documento.

2. EL FENÓMENO DE LAS DESCARGAS PARCIALES.

Según la norma UNE-EN 60270 una descarga parcial es “una descarga eléctrica confinada en un espacio provocando un fallo parcial del aislamiento existente entre conductores, los cuales se encuentran a diferente potencial” [1]. Las descargas parciales se producen por una concentración de impulsos eléctricos locales que se dan en el aislador o en la superficie del mismo. Suelen durar menos de 1 μ s.

Las descargas parciales son fenómenos que se producen en los materiales aislantes de los equipos eléctricos. Estos materiales se ven sometidos a un campo eléctrico lo bastante grande, como para que el medio se ionice. Una vez que se ha provocado esta ionización, en algún lugar del espacio entre electrodos, se ocasionará la ruptura dieléctrica formándose un pequeño arco que desgasta el material y provoca cambios en las propiedades del mismo.

Junto con la degradación del aislamiento, se producen también una serie de efectos que debemos tener en cuenta ya que pueden ser perjudiciales tanto para personas como para los equipos de la red. Estos efectos son [2]:

- Radiación UV, radiación electromagnética cuya longitud onda está comprendida entre los 400 y los 15 nanómetros. Se producen en frecuencias de $7,5 \cdot 10^{14}$ y $6 \cdot 10^{16}$ Hz.
- Rayos X, radiaciones electromagnéticas con longitud de onda comprendida entre los 10 y los 0,01 nanómetros. La banda de frecuencia en la que se producen es la establecida entre los $6 \cdot 10^{16}$ y los $1 \cdot 10^{20}$ Hz.
- Formación de ozono (O_3), molécula formada por tres átomos de oxígeno, se trata de un gas incoloro que presenta un peligro para la salud de las personas si se respira en grandes cantidades, pudiendo provocar la irritación de ojos y garganta.
- Disipación de energía en forma de calor, se debe a que durante la formación de las DPs (Descargas Parciales) se produce una gran cantidad de energía en el punto de origen que se libera al exterior como calor.
- Ruido en frecuencias audibles y ultrasónicas, ondas electromagnéticas que pueden afectar a comunicaciones.
- Vibraciones, debido a las ondas de presión que se desplazan en el interior del aislamiento.

Para que se produzcan las descargas parciales debe de existir algún fallo en el aislamiento, como puede ser:

- Burbujas en el interior del aislamiento debido a cortocircuitos o sobrecalentamientos.
- Huecos producidos en el aislamiento a causa de los incrementos de temperatura en ellos.
- Grietas presentes en la estructura del aislamiento.
- Fallos de diseño del sistema de aislamiento e impurezas.
- Presencia de elementos extraños, como el polvo.
- Pérdida de homogeneidad del aislamiento debido a procesos de envejecimiento.

2.1. Tipos de Descargas Parciales.

Una de las maneras de clasificar las descargas parciales, es en función de la parte del aislamiento en la que se producen. En este sentido cabe distinguir entre:

- Descargas internas, producidas dentro de máquinas a causa de defectos en materiales como resina o papel.
- Efecto corona, en los tornillos de los cables o en los bordes afilados de máquinas.
- Descargas superficiales, en devanados de generadores o terminales de cables.

2.1.1. Descargas Parciales Internas.

Las descargas parciales internas se dan en puntos de baja rigidez dieléctrica ubicados en sólidos o burbujas de líquidos [3]. El origen de las descargas internas está en un fuerte estrés dieléctrico debido a la diferencia de permitividades entre el aislante y el defecto. Como consecuencia de esto, pueden aparecer a tensión nominal. Los diferentes lugares donde se pueden producir este tipo de descargas parciales son los siguientes:

- Vacuolas de gas de baja rigidez dieléctrica.
- Incrustaciones de partículas extrañas.
- Protuberancias metálicas
- Grietas internas del material
- Frontera cercana a algún electrodo

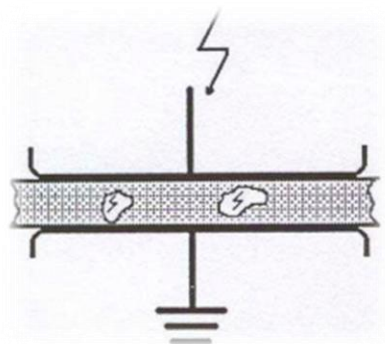


Ilustración 1: Descarga parcial Interna.
Tomada de [1].

En general, las descargas internas suelen tener un valor pequeño, aunque es difícil saber con exactitud el valor de la misma. El número de DPs no dependerá de los valores máximo de la tensión aplicada, si no del momento máximo de: du/dt (derivada de la tensión con respecto al tiempo), como se puede ver en la ilustración 2 [2].

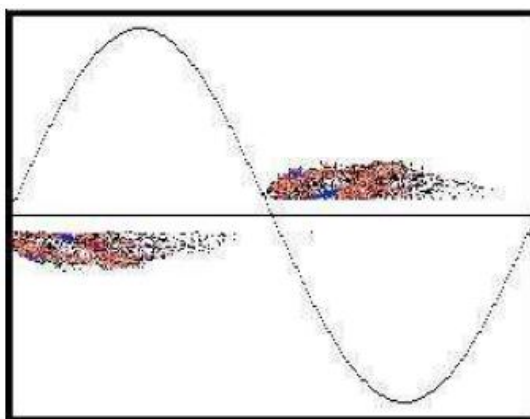


Ilustración 2: Patrón de Descarga Parcial Interna.
Tomada de [1].

2.1.2. Descargas Parciales de efecto Corona.

Las descargas parciales de efecto corona se producen en geometrías punta-gas-plano, de manera que la alta variación de campo eléctrico resultante provoca una ruptura del aislamiento que proporciona el gas [2]. Se producen cuando la rigidez dieléctrica del material aislante, es mayor que la del aire. Este tipo de descargas suelen generar ruido y luz en forma de chisporroteo [4].

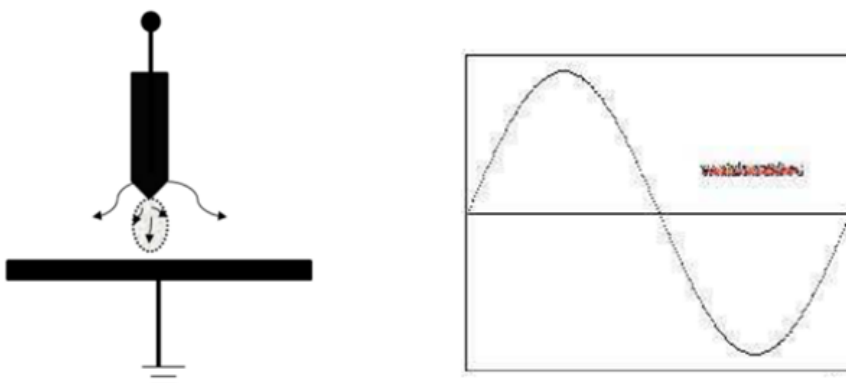


Ilustración 3: Patrón de Descarga Parcial efecto Corona. Tomada de [2]

Las DP de efecto corona tienen un patrón muy característico ya que se producen en el semiciclo negativo de la tensión y tienen un valor prácticamente constante. Sin embargo si las tensiones son muy altas, pueden aparecer pulsos en el semiciclo positivo [2].

2.1.3. Descargas Parciales Superficiales.

Las descargas parciales superficiales pueden producirse entre materiales dieléctricos ó entre el conductor y el aislamiento a causa de factores medioambientales (humedad) ó contaminantes. Cuando la tensión aplicada es máxima, se produce la DP, a causa de la gran intensidad de la componente tangencial del campo eléctrico (ilustración 4). En la práctica este tipo de descargas se presentan en terminales de cables, bornes y salientes de los devanados de un generador [2], [4].

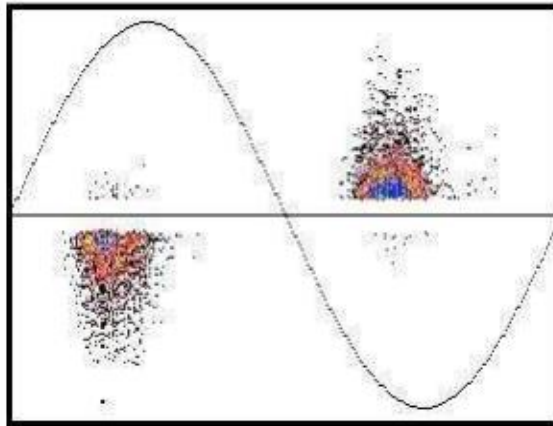


Ilustración 4: Patrón de Descarga Parcial superficial. Tomada de [2]

2.2. Análisis cuantitativo de las Descargas parciales.

Las descargas parciales son un fenómeno estocástico, ya que su evolución en el tiempo es variable [10]. Este fenómeno puede deberse a distintos factores y evolucionar de un modo u otro por distintos motivos [2]:

- Los responsables de la aparición de la primera descarga suelen ser las radiaciones ionizantes o bien las cargas atrapadas que pueden aparecer en los sólidos o en los líquidos.
- Tras una descarga en el aislamiento sólido quedan atrapados iones y electrones que pueden dar lugar a la aparición de nuevas DP.
- Esta carga almacenada en los elementos, puede verse reducida por la humedad o aumentada por otros defectos.
- Cuando se produce una descarga, las propiedades del elemento en el que se ha producido cambian, lo que puede influir para que vuelvan a producirse más.
- Tras una descarga se produce una concentración de nuevos electrones, iones y metaestables. La concentración no es determinista y depende de varios factores.

Como se ha dicho, las DPs tienen un carácter estocástico, por lo que se debe estudiar desde el ámbito estadístico. De este modo, por ejemplo, la magnitud de los pulsos debe ser tratada de forma estadística para caracterizar la evolución del aislamiento; para ello, se emplean los siguientes parámetros típicos de distribuciones de Weibull [2], [6]:

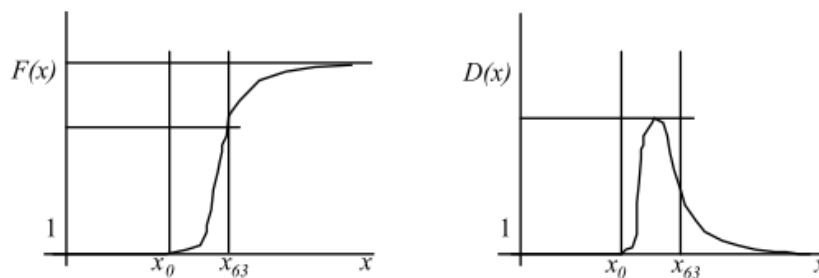


Ilustración 5: Función de distribución de probabilidad (izquierda), y densidad de probabilidad (derecha). Tomada de [2]

- BETA (β): Mide la variabilidad de las magnitudes de una DP.
- ALFA (α): es un parámetro de escala que indica la magnitud que ha alcanzado el 63.2 % de los pulsos.
- $Q_{\max 95\%}$: indica la magnitud máxima que ha alcanzado el 95% de los pulsos.

2.3. Análisis cualitativo de las Descargas Parciales.

Desde el punto de vista cualitativo, las descargas parciales se deben caracterizar por medio de la magnitud de la intensidad, la frecuencia y el ángulo de fase.

2.3.1. Magnitud de la Intensidad

La magnitud de la intensidad dependerá del material con el que esté hecho el aislamiento, del equipo en el que se realiza la prueba y del tipo de sensor utilizado.

Generalmente se emplean dos sistemas de medida de DPs [12]:

- Sistema de medición de banda ancha de descargas parciales: Permite la detección de las descargas parciales mediante el circuito característico de la impedancia característica Z . Esta impedancia tendrá unos valores fijos de frecuencia dentro de un rango de alta y baja frecuencia. El tipo de sensores usados para este sistema, puede variar su barrido de frecuencia de 100MHz a 1GHz [35].
- Sistemas de medición de banda estrecha de descargas parciales: La frecuencia de la amplitud del espectro del impulso de corriente tiene un valor constante. La impedancia de transferencia Z debe tener una frecuencia de 20 Db por debajo de la de banda de paso máximo. El tipo de sensores usados para este sistema, puede variar su barrido de frecuencia de 20kHz a 30kHz [35].

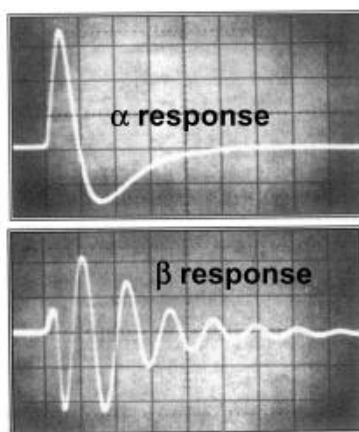


Ilustración 6: Tipo de respuesta para banda ancha (α) y banda estrecha (β). Tomada de [13].

2.3.2. Frecuencia y Ángulo de Fase.

La frecuencia en las descargas parciales, se refiere a la tasa de repetición con la que se producen las descargas parciales debido a diferentes causas que más adelante se estudiarán.

El ángulo de fase tiene que ver con el desfase existente entre la descarga parcial y la onda de tensión aplicada.

3. AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE EN TRANSFORMADORES.

En este capítulo se explica la constitución física del aislamiento de los transformadores de potencia, y se describe de manera general el mantenimiento que se suele realizar sobre ellos.

3.1. Aislamiento sólido

El sistema de aislamiento de un transformador de potencia está compuesto principalmente de papel y aceite. El aislamiento entre espiras se realiza enrollando varias capas de papel sobre los conductores. En las bobinas externas hay dos capas de papel. En los canales de circulación de las bobinas hay aceite, además de anillos de cartón. En los arrollamientos del transformador existen tubos aislante y aceite en los canales [7].

3.1.1. Tipos de aislantes sólidos.

El sistema de aislamiento de un transformador está compuesto por tres tipos diferentes de aislantes sólidos. A continuación se muestran las características más importantes y el proceso de fabricación de cada uno de ellos.

A. Papel Kraft

El principal compuesto del papel es la celulosa extraída del algodón y de la madera. La celulosa es muy difícil de encontrar en estado puro en la naturaleza ya que está asociada a otros compuestos como la lignina y las pentosas.

En el proceso de fabricación del papel, la madera es tratada químicamente para reducir el contenido en estas sustancias. El papel más usado para el uso en transformadores es el conocido como papel kraft. Para su obtención, la madera pasa un proceso en el que se trata con hidróxido de sodio (NaOH) y con sulfato de sodio (Na₂SO₄)

El papel tiene que tener un espesor entre 30 μm y 120 μm con una densidad que oscile entre los 0,7 y los 0,8 g/cm^3 . Otra propiedad que debe poseer el papel es una fuerte resistencia a la tracción, que se expresa mediante el término longitud de tracción, que debe de estar entre los 6-9 kN. La propiedad más importante del papel, que como tal le hace aislante, es la rigidez dieléctrica a frecuencia nominal (50 Hz o 60 Hz) que tiene un valor entre 100 y 150 kV/cm [23].

B. Cartón prensado: Pressboard

La obtención del pressboard se realiza mediante la compresión de varias capas de papel húmedo, sin tener que usar ningún tipo de material de contacto. Se pueden encontrar principalmente dos tipos de pressboard [19]:

- I. Pressboard calandrado: El pressboard calandrado se obtiene mediante un proceso de prensado con el posterior secado sin presión. Para la finalización de su fabricación es enrollado con unas condiciones de presión elevadas, con las que finalmente obtenemos un producto con una densidad de entre 1,15 y 1,3 Kg/dm^3 .

- II. Pressboard precomprimido: Su fabricación se basa en la deshidratación del material, posteriormente se debe de solidificar y secar. Con este proceso se obtiene un pressboard con una densidad de $1,25 \text{ Kg/cm}^3$.

3.1.2. Papel-aceite como material aislante.

Normalmente los aislamientos sólidos del transformador se suelen impregnar con aceite, lo que consigue mejorar sus propiedades aislantes significativamente [8].

Al impregnar el papel con aceite, se aumenta su rigidez dieléctrica, ya que el aceite rellena los huecos de aire que se forman al prensar el papel, que son muy propensos a que se formen descargas parciales en su interior. La rigidez dieléctrica del conjunto depende del método de impregnación que se halla llevado a cabo. Ésta varía entre los 200-400 kV/cm [19].

3.2. Aislamientos Líquidos.

El aislante líquido de los transformadores, es junto con el aislante sólido uno de los elementos más importantes del transformador, ya que por sus características físicas, químicas y eléctricas es idóneo para su uso como refrigerante y aislante. A parte de sus cualidades para aislar y refrigerar también posee unas cualidades excepcionales como chivato, ya que mediante las pruebas pertinentes nos informa de todos los problemas que puede haber en un transformador. Otra cualidad más del aislante líquido es el poder de disipación que tiene del calor [9]. Durante el periodo de explotación del transformador el aceite sufre una serie de cambios, lo que provoca que sus propiedades se deterioren.

Una de las principales causas que provocan el envejecimiento del aislante líquido son las altas temperaturas, ya que aceleran reacciones químicas que se producen en el aceite. Otro de los factores que provocarán el envejecimiento inminente del aislante líquido es el oxígeno disuelto o en contacto con el aislamiento. El agua actúa como catalizador de la formación de ácidos y óxidos y por lo tanto es otro factor determinante del envejecimiento del aceite. Su efecto sobre la rigidez dieléctrica es negativo, haciéndola disminuir. Como se puede ver en la ilustración 7 el efecto de la humedad sobre la rigidez es muy acusado [19].

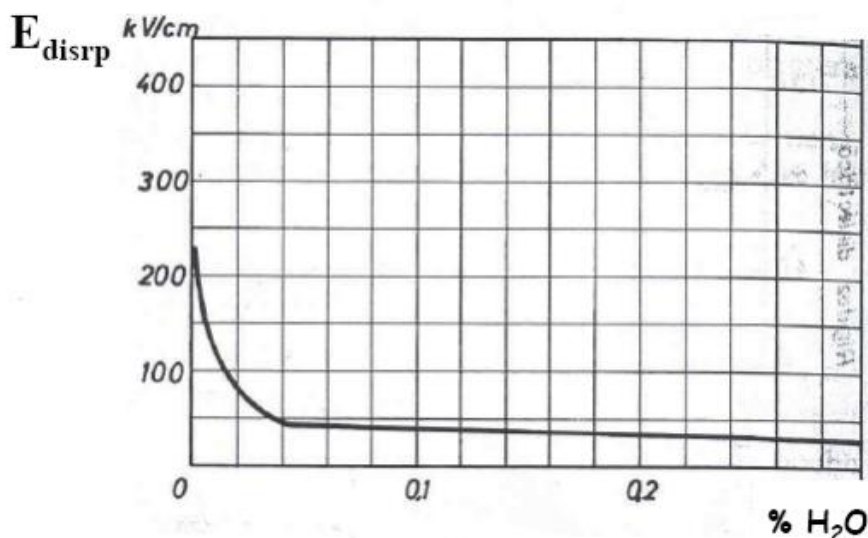


Ilustración 7: Evolución de la rigidez dieléctrica con respecto a la humedad. Tomada de [19]

Las cualidades más importantes que debe cumplir un aislante líquido son las siguientes:

1. Propiedades Eléctricas:
 - Alta tensión de ruptura.
 - Bajo factor de pérdidas dieléctricas.
2. Propiedades Físicas:
 - Alta viscosidad y densidad.
 - Alto punto de inflamación.
 - Alta tensión superficial.
3. Propiedades químicas:
 - Estabilidad frente a la oxidación.
 - Bajo contenido en humedad.
 - Alto índice de neutralización.
 - Contenido de inhibidor de oxidación.
4. Propiedades adicionales:
 - Estructura poliaromática.
 - Propiedades de solubilidad.

Se pueden encontrar diferentes tipos de aceites usados en los transformadores. Los más comunes son los aceites minerales, aunque hay una serie de fluidos alternativos que también se usan. A continuación se exponen ambos.

3.2.1. Aceite Mineral

El aceite mineral es usado para aislar y refrigerar transformadores desde hace un siglo. Se obtiene a partir del refinado y destilación del petróleo, y su calidad depende del tipo de petróleo utilizado. El aceite mineral principalmente está constituido por hidrocarburos de diferentes bonos. De todos los aislantes líquidos es el más económico. Los hidrocarburos que componen el aceite mineral tienen una composición muy pareja [19].

Elemento	Porcentaje
Carbono	84-87
Hidrógeno	11-14
Azufre	0-2
Nitrógeno	0-2
Oxígeno y metales	trazas

Tabla 1: Composición del Aceite Mineral.

A. Tipos de Aceites Minerales.

Se pueden encontrar diferencias en el aceite mineral, dependiendo de su contenido y naturaleza química. Podemos diferenciar tres grandes grupos: nafténico, parafínico o aromático.

- Aceites Parafínicos: la fórmula química de este tipo de aceites es la que se muestra en la siguiente ilustración. Tiene un cadena abierta lineal o ramificada [8].

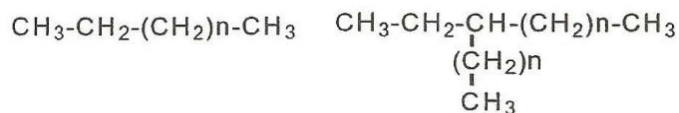


Ilustración 8: Aceites parafínicos. Tomada de [19]

Sus principales características son las siguientes:

- Baja densidad.
 - Punto de congelación alto.
 - Volatilidad baja.
 - Índice de viscosidad alto.
 - Alto punto de inflamación
 - Oxidación retardada con periodo de inducción.
 - Punto de anilina elevado.
- Aceites Nafténicos: Se trata de hidrocarburos de cadena cerrada. Su fórmula química se puede ver en la siguiente ilustración [8].

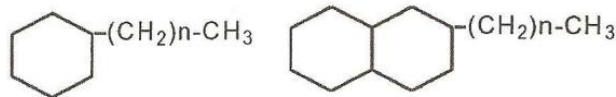


Ilustración 9: Aceites Nafténicos. Tomada de [19]

Sus principales características son las siguientes:

- Elevada densidad.
 - Índice de viscosidad bajo.
 - Volatilidad alta.
 - Bajo punto de inflamación.
 - Punto de congelación bajo.
 - Punto de anilina bajo.
- Aceites aromáticos: Su uso no es muy común. Su fórmula química se puede observar a continuación [22], [23].

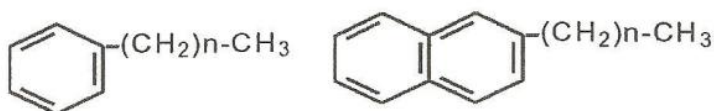


Ilustración 10: Aceites Aromáticos. Tomada de [19]

La mayoría de los aceites que se usan como aislantes, son los parafínicos, ya que son los más comunes y su proceso de fabricación es el más sencillo.

Las características físicas, químicas y eléctricas que debe de tener un buen aceite mineral aislante son las siguientes:

- ❖ Elevada calidad dieléctrica.
- ❖ Baja viscosidad, para facilitar la formación de corrientes refrigerantes.
- ❖ Alta fuerza dieléctrica.
- ❖ Alta capacidad de calor.
- ❖ Bajo contenido en humedad (< 10 ppm), impurezas químicas y contaminantes mecánicos.
- ❖ Alta rigidez dieléctrica (> 70 kV).
- ❖ Baja tangente de delta ($< 10 \cdot 10^{-3}$).

B. Proceso de fabricación del aceite mineral

Para conseguir las propiedades necesarias en el aceite, se parte de una reducción del petróleo en sus fracciones más altas. Tras esta reducción hay que seguir los siguientes pasos:

- I. Destilación en vacío.
- II. Desasfaltado.
- III. Eliminación de los hidrocarburos aromáticos.
- IV. Desparafinado.
- V. Tratamiento de acabado.

Tras este proceso, es necesario añadir una serie de aditivos, que mejoran la calidad del mismo. Los aditivos más comunes son los inhibidores de oxidación, pasivantes, anticongelantes, aditivos que aumentan la resistencia a la formación de gases [19].

C. Factores que deterioran el aceite [19]:

Los factores que tienen mayor influencia en la degradación del aceite son los siguientes:

- i. Temperatura: Es el factor de mayor importancia ya que es el que afecta más negativamente al aislante. Reduce su vida media.
- ii. Agua: El agua puede estar presente de forma disuelta o como gotas. El agua produce que la rigidez dieléctrica disminuya, baja el valor de la tangente de delta y degrada al aceite.
- iii. Gases disueltos: Hidrógeno, oxígeno, metano, CO_2 ... que están presentes a causa de un tratado inapropiado antes de su uso. Acelera el proceso de envejecimiento.
- iv. Partículas: Tanto éstas, como los gases disueltos, aparecen por un mal proceso de manufactura. Favorecen la aparición de descargas parciales. Pueden contener entre un 0,0001% y un 0,001 % de partículas, para que el aceite esté en buenas condiciones.
- v. Productos iónicos y polares: Afectan a las propiedades eléctricas.

3.2.2. Fluidos Alternativos al Aceite mineral.

En los últimos tiempos se han propuesto diferentes alternativas al aceite mineral, dado su alto nivel en contaminantes y su procedencia del refinado del petróleo. Los mejores aceites para el medio ambiente son los vegetales, ya que en su totalidad son biodegradables. Este tipo de aceites tienen unas propiedades muy buenas como una alta rigidez dieléctrica, o un punto de combustión elevado.

A. Aceites vegetales

Los aceites vegetales ó esteres naturales, son biodegradables y no tienen apenas impacto en el medio ambiente. Son un conjunto de ácidos grasos saturados e insaturados individuales, dobles y triples. Los fluidos que mejores resultados han dado son los ácidos insaturados individuales. En la tabla 2 se puede observar la composición de algunos aceites vegetales empleados en el uso electrotécnico [27].

Los aceites vegetales son higroscópicos, es decir, son capaces de absorber la humedad que pueda haber en el transformador, hasta un valor de 1000ppm de agua a temperatura ambiente (ilustración 11). Su punto de inflamación es aproximadamente el doble que el del aceite mineral.

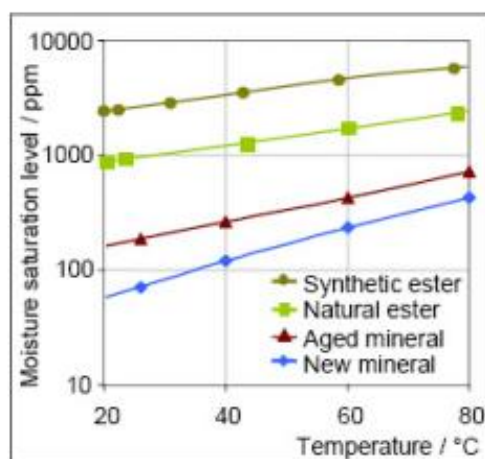


Ilustración 11: Saturación para cada tipo de aceite con respecto a la temperatura. Tomada de [27]

En la tabla siguiente se puede ver la composición de cada uno de los aceites vegetales, incluido el aceite de colza [27].

Aceite Vegetal	Ácidos Grasos Saturados [%]	Ácidos Grasos Insaturados (%)		
		Mono-	Bi-	Tri-
Aceite Com	12,7	24,2	58	0,7
Aceite Cottonseed	25,8	17,8	51,8	0,2
Aceite Peanut	13,6	17,8	51,8	0,2
Aceite Olive	13,2	73,3	7,9	0,6
Aceite safflower	8,5	12,1	74,1	0,4
Aceite safflower high oleic	6,1	75,3	14,2	-
Aceite Soybean	14,2	22,5	51	6,8
Aceite Sunflower	10,5	19,6	65,7	-
Aceite Sunflower high oleic	9,2	80,9	8,4	0,2
Aceite de Colza	7,9	55,9	22,1	11,1

Tabla 2: Composición de los aceites vegetales.

B. Esteres Sintéticos

Los esteres sintéticos se derivan de productos químicos. Es un compuesto formado por un ácido y un alcohol. En la siguiente ilustración se puede observar un ejemplo de la síntesis del éster:

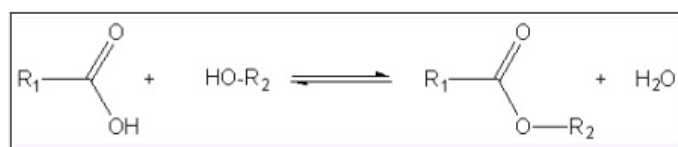


Ilustración 12: Ejemplo de síntesis del éster.

Como los esteres naturales, se tratan de aislantes biodegradables, lo que es una gran ventaja ya que no son perjudiciales para el medio ambiente ni para los seres humanos. Su punto de inflamación es muy parecido al de los aceites minerales. También es un líquido higroscópico, que como se ha dicho anteriormente es capaz de absorber hasta 1000 ppm a temperatura ambiente. Su principal inconveniente es que tiene una viscosidad que es casi el doble que el aceite mineral, lo que le convierte en un mal disipador del calor [24], [22].

C. Aceite de Silicona.

Los aceites de silicona se presentan como una alternativa más fiable que los aceites vegetales a los minerales. El principal inconveniente que tienen, es que son muy caros. Las propiedades que debe cumplir según la norma europea son las siguientes [22]:

:

Propiedades	
Tensión de ruptura [kV]	40
Factor de disipación a 90 °C (%)	< 0,0005
Permitividad relativa	2,2
Resistividad a 90 °C [Ωm]	1,5 ·
Número de neutralización [mg KOH/g]	< 0,03
Contenido en agua [ppm]	-

Tabla 3: Propiedades de las siliconas.

Su principal cualidad reside en que tienen un punto de inflamación muy alto, lo que lo hace idóneo para aplicaciones de seguridad contra incendios. Gracias a esta propiedad y a que es muy estable se usa principalmente en transformadores de tracción. Cada vez es más habitual usarlo en transformadores que deben de soportar altas temperaturas. Tienen una alta resistencia a la oxidación.

Uno de sus mayores inconvenientes es que no son biodegradables, y además tienen un fuerte impacto al medio ambiente. Otro inconveniente es su alta viscosidad, lo que los hace malos conductores del calor [22].

3.3. Mantenimiento en Transformadores.

Los transformadores se diseñan para que puedan tener una vida útil de unos 30 años, pero en algunos casos puede ser incluso más. Existen una serie de técnicas de mantenimiento de campo, que permiten seguir el estado del transformador, y detectar averías de forma precisa y rápida [16].

Para este mantenimiento se debe tener en cuenta que las condiciones en campo no son iguales para todos los transformadores, ni son las mismas que se tendrían en un laboratorio. Por eso no se puede usar equipos muy voluminosos, no puede haber largos tiempo de desconexión, lo que limita más los ensayos. A continuación se detallan los ensayos que se suelen realizar:

A. Ensayos de los circuitos eléctrico/magnético:

Se trata de medir una serie de parámetros básicos en el transformador, para emitir un diagnóstico. Estos ensayos se realizarán todos off-line (fuera de servicio).

Ensayo de vacío: Este ensayo consiste en la aplicación de una tensión en el devanado de alta tensión del transformador, estando el de baja tensión abierto.

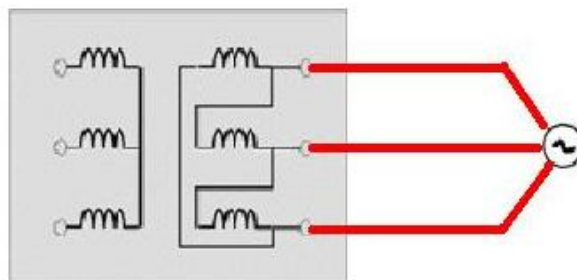


Ilustración 13: Circuito para realizar el ensayo de vacío.
Tomada de [17].

La primera medida que se obtiene será el cociente entre la tensión de alta y la de baja (relación de transformación), y deberá ser igual al valor de la placa de características. Para transformadores con cambio de tomas, se aprovechará para hacer un registro de todas las posiciones del regulador. También nos informará de la presencia de cortocircuitos en las espiras. Otra de las medidas que se tomarán, será la corriente de excitación, que es la que circula por el devanado de alta tensión. Deberá ser proporcional a la corriente de vacío tomada en el laboratorio [16].

Ensayo de Cortocircuito: Es ensayo consiste en la aplicación de una tensión en el devanado de alta tensión, estando el de baja cortocircuitado.

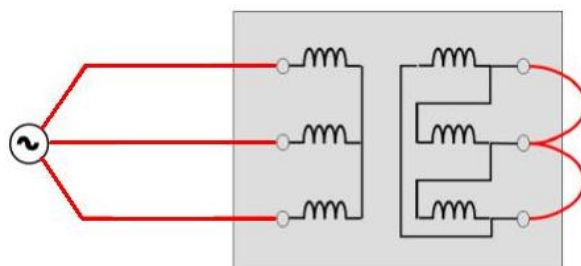


Ilustración 14: : Circuito para realizar el ensayo de cortocircuito. Tomada de [17]

La primera medida que se obtendrá será la tensión de cortocircuito, que se expresa en tanto por ciento, y es la tensión que hará que en el devanado secundario circule corriente nominal. Su variación nos indicará modificaciones en el circuito magnético, como desplazamiento de bobinados, cortocircuitos, deformaciones etc. [16]

Medida de la resistencia de bobinados: Con esta prueba se obtiene la medida de la resistencia de cada bobinado, y si existiera cambiador de tomas, de cada una de las posiciones. Para la obtención de los resultados se debe tener en cuenta tiempos de magnetización y estabilización, debido al carácter inductivo del transformador. Al comparar los estos resultados con los obtenidos en fábrica, darán información sobre el estado del conexionado del regulador y de los bobinados. [16], [17]

Ensayo de respuesta en frecuencia: El objetivo es determinar la curva de respuesta en frecuencia del conjunto del transformador. Existen dos técnicas para este ensayo [16], [17]:

1. Técnica de barrido en frecuencia: Se realiza mediante la sincronización de un generador de barrido de baja tensión con un medidor de nivel. El resultado es una curva que relaciona las atenuaciones por fase con las frecuencias.
2. Técnica de pulso: Se inyecta un pulso rápido de $\sim 500\text{V}$ al transformador y se recoge el mismo tanto en la entrada como en la salida de cada fase.

Un ejemplo de este ensayo es el dado por la siguiente ilustración:

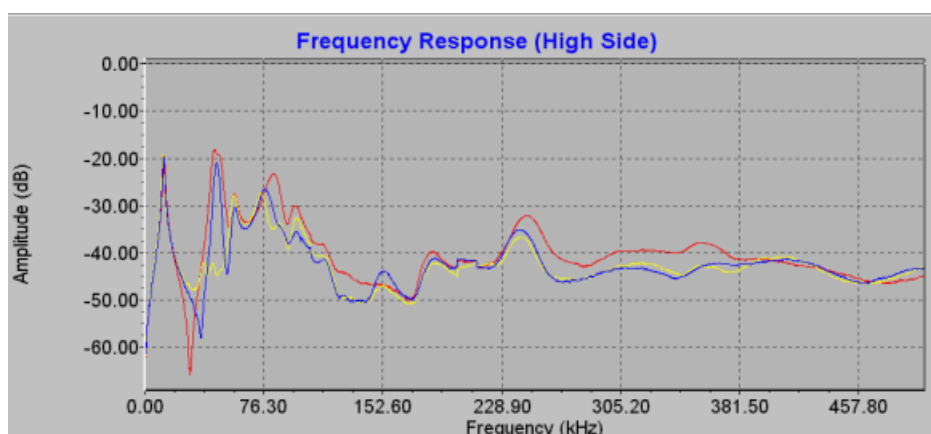


Ilustración 15: Ejemplo de ensayo en frecuencia.

Todos los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos anteriores se someten a una evaluación pudiendo así dar un diagnóstico completo del estado del mismo. Existen unos valores normalizados para todas las medidas realizadas en los ensayos anteriores.

B. Ensayos de campo del sistema dieléctrico [16]:

Se trata de una serie de ensayos que dan información del estado del dieléctrico del transformador, usando herramientas electrónicas de medida. Estos ensayos se realizan, como los anteriores, off-line.

Resistencia de aislamiento: Para la realización de este ensayo se usan equipos capaces de suministrar altas tensiones en continua, que aplicadas en el dieléctrico da información sobre su estado. Su valor se obtiene como el cociente entre el valor de la tensión y la corriente aplicada en el primer minuto. Dado que está muy influenciado por la temperatura, también hay que hallar el índice de polarización, que se obtiene como el cociente entre la corriente obtenida en el minuto uno y la obtenida en el minuto 10.

Tensión de Reabsorción: En este ensayo se obtienen datos sobre la humedad disuelta en el transformador y la degeneración de sus componentes, mediante la obtención del espectro de polarización del dieléctrico. Un ejemplo del espectro de polarización se puede ver en la

siguiente ilustración. Cuanto mayor sea el contenido de humedad mayor será la desviación del máximo hacia la izquierda.



Ilustración 16: Ejemplo de espectro de polarización.

Tangente de Delta:

La medida de la tangente de delta, también informará sobre el estado del dieléctrico. Dará datos acerca del grado de humedad y de la contaminación del mismo. Al ser necesario unas altas tensiones en corriente alterna se necesitan grandes y voluminosos equipos.

Ensayos de Descargas Parciales: En este tipo de ensayos, es lo que se ha basado nuestra investigación, por lo que a continuación se detalla de una manera más extensa.

4. DPS EN AISLAMIENTOS DE TRANSFORMADORES.

En un transformador bien diseñado es muy difícil que se produzcan descargas parciales. Para que éstas se produzcan, debe de haber un defecto en el aislamiento. Los defectos más comunes son los siguientes [18]:

- Delaminación: Suele ocurrir cuando láminas de cartón se pegan con pegamento para formar otras mayores y quedan oquedades.
- Partículas metálicas libres: Procedentes del proceso de fabricación.
- Humedad: La humedad puede contribuir de varias maneras a que las descargas se inicien y se extingan. Debido a que el aceite tiene poca solubilidad se produciría una sobresaturación de aceite en la superficie de la celulosa lo que provocaría gotas de agua y burbujas. La evaporización del agua provocaría micro burbujas que darían lugar a las descargas.
- Mala conexión de los blindajes electrostáticos: Dará grandes descargas debido a que la capacitancia de defecto es elevada.
- Oquedades de diversos orígenes: En partes encoladas y conexiones esmaltadas, por insuficiente impregnación, en pasatapas... Alto contenido en humedad combinado con calor y alta concentración de campo pueden provocar gran presión de vapor de agua y un fenómeno “efervescente” en cartones y aislamiento de las bobinas.

En la actualidad, en los transformadores se realizan pruebas de DP, tanto off-line (fuera de línea) como on-line (en línea) como se describirá más adelante.

4.1. Normativa relacionada con las DP en transformadores.

La normativa relacionada con la detección de las Descargas parciales en transformadores es la siguiente [18]:

- IEC 60270 Técnicas de ensayo en alta tensión. Medida de descargas parciales.
- IEC 62478 Técnicas de ensayo en alta tensión (esta norma está en preparación). Medida de descargas parciales por métodos electromagnéticos.
- Nema 107 Methods of Measurement of Radio Influence Voltage (RIV) of High Voltage Apparatus. ASTM D1868-93 Standard test method for detection and measurement of partial discharge.
- IEC 60076-3 Transformadores de Potencia. Parte 3: Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancias de aislamiento al aire.

4.2. Patrones de Descargas Parciales en Transformadores.

Se han realizado varias investigaciones para ver si existe un patrón en los diferentes tipos de descargas. Se han encontrado varias similitudes como las que se muestran en la siguiente ilustración:

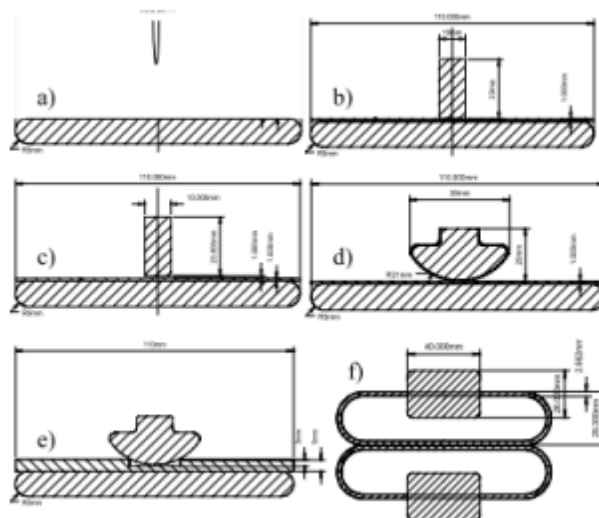


Ilustración 17: Varios ejemplos sobre modelos de DP.

La tasa de repetición de impulsos es baja para defectos individuales como puntos afilados (posiblemente debido a la falta de electrones de partida), mientras que será alta para defectos distribuidos (por ejemplo, exceso de estrés en cuña) y para "capacitancias" en alta sobrecarga por encima de la tensión inicial [32].

4.3. Pruebas que debe de pasar un transformador nuevo.

La prueba de descargas parciales de puesta en marcha que un transformador debe de pasar según la norma UNE-60270 tiene un nivel de aceptación de 300/500 pC a $1,3 \cdot U_n / 1,5 \cdot U_n$ respectivamente. Los fallos que se pueden detectar en las pruebas de puesta en marcha son los siguientes [12]:

- Aire atrapado en la estructura de aislamiento cuando se llena de aceite.
- Presencia de humedad
- Fallo en el diseño
- Fallo causado por sobre estrés.

4.4. Estudios experimentales sobre DP en aislamientos sólido.

A continuación se detallan una serie de ensayos que han llevado a cabo investigadores, para ver cómo afectan las DP al aislamiento del transformador.

4.4.1. Simulación de distintos efectos que provocan DPs

En [12] se lleva a cabo una serie de experimentos simulando algunos de los problemas citados anteriormente. El experimento se realizó sobre una muestra de pressboard de 3 mm de espesor, con una configuración de electrodos como la que se muestra en la siguiente ilustración:

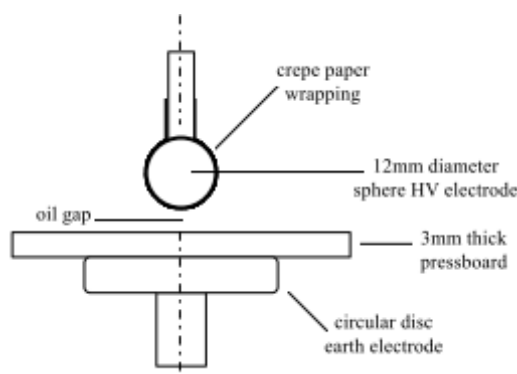


Ilustración 18: Configuración de electrodos.
Tomada de [12].

El electrodo de alta tensión es una esfera de 12 mm de diámetro. La toma de tierra es un disco plano y circular de 25 mm de diámetro.

El primer fenómeno estudiado fue la aparición de chispas, ya que la presencia de éstas puede producir un alto nivel de descargas parciales que acaben quemando el aislamiento. La prueba se llevó a cabo a una tensión en torno a los 4 kV/mm. Durante los primeros 30 minutos de la prueba se observó que aparecieron DPs en torno a valores de 150 pC. Tras estos 30 minutos, la tasa de repetición aumentó, pero el nivel disminuyó hasta valores 10 nC.

Tras la conclusión de las pruebas se observó como el pressboard tenía una serie de quemaduras causadas por las DPs.

Posteriormente, se estudió el efecto de las descargas parciales sobre el aislamiento. Para ello se intercalaron dos muestras de pressboard. En la parte inferior se colocó pressboard nuevo, mientras que en la parte superior se colocó el pressboard con marcas de quemadura de la prueba anterior. Estando el electrodo esférico separado, se sometió al aislante a una tensión de 4 kV/mm, y se observó que tanto la tasa de repetición como el nivel de DPs fue muy bajo (<20 pulsos por segundo y la magnitud <30 pC respectivamente).

Cuando se acercó el electrodo esférico al pressboard con quemaduras, estos niveles se dispararon hasta valores de 1200 pC y 4000 pulsos por segundos de repetición, incluso aplicándole tensiones por debajo de los 2,7 kV/mm.

El tercer fenómeno que se estudió fue las DPs cuando existen partículas metálicas en el aislamiento. En un primer momento, se colocó una partícula metálica en el aislante, y se podía observar cómo según se iba aumentando la tensión aplicada, a una distancia de 4mm entre el electrodo y el aislamiento, la partícula se iba acercando al electrodo esférico sin provocar descargas parciales (ilustración 19).

Tras este experimento, se aumento la distancia a 6mm, y se observó el mismo efecto que anteriormente, pero aparecieron descargas a partir de los 15kV/mm.

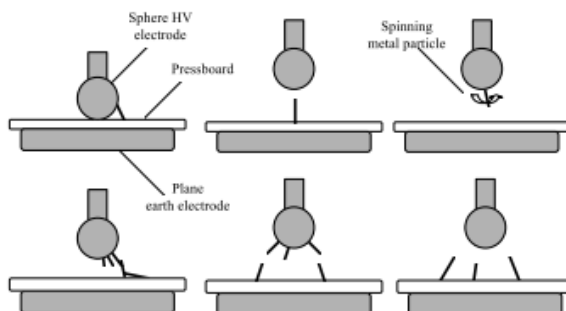


Ilustración 19: Diferentes posiciones de la partícula. Tomada de [12]

El cuarto fenómeno de estudio fue la humedad. El pressboard usado tenía aproximadamente un 4% de humedad. La tensión aplicada en este caso fue de 8 kV/mm. Se observó que la actividad de DPs era estable, y que en los dos semiciclos tenían magnitudes parecidas pero con patrones muy diferentes.

4.4.2. Efecto de las DPs en la capacidad de soportar sobretensiones.

En [24] se detalla un experimento, en el que se comparan resultados sobre distintos ensayos al aislamiento del transformador formado por pressboard impregnado en aceite. La intención del siguiente ensayo es el estudio de la reacción del aislante ante una tensión tipo rayo, en el cuál se han provocado descargas parciales con anterioridad. En la siguiente ilustración, se pudo observar un esquema del transformador que se ha estudiado.

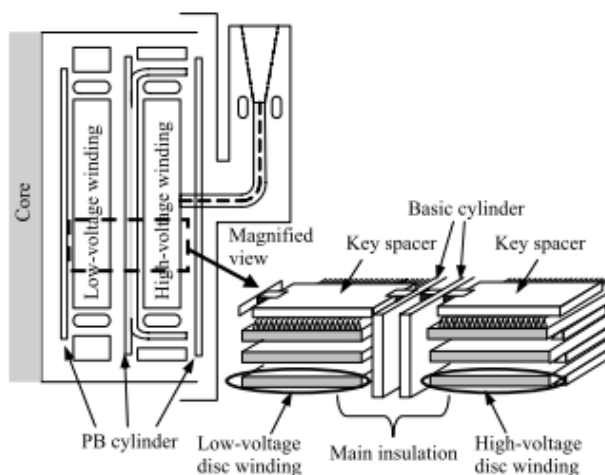


Ilustración 20: Vista interna del transformador. Tomada de [20].

Para el sometimiento del aislante a las descargas parciales se usó un dispositivo punta-plano como el que se puede ver en la siguiente ilustración:



El valor de campo eléctrico se obtiene con la siguiente ecuación:

Donde:

V es la tensión aplicada.

E(x) es el campo eléctrico en función de la distancia.

d es la distancia entre electrodos.

Al aplicar el mismo valor de tensión y misma distancia “d” entre electrodos en ambas configuraciones, el valor en módulo del campo eléctrico, debe de ser igual, pero la configuración punta-plano da un valor instantáneo de punta más elevado (E_{\max}).

El campo eléctrico generado en la punta del electrodo viene determinado por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{2 \cdot V}{r \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot d}{r}\right)}$$

Donde:

E es el campo eléctrico.

V es el valor de la tensión aplicada.

r es el radio de la punta del electrodo.

d es la distancia entre electrodos.

El electrodo de aguja tenía 2 mm de diámetro. La distancia entre el pressboard y la aguja era de 1mm. Se realizaron dos tipos de pruebas, una a corto plazo con una mayor intensidad, y otra a largo plazo con menor intensidad.

En la prueba a corto plazo se sometió al pressboard a un nivel de DP de entre 5.000 y 15.000 pC durante una, dos y cuatro horas. En la prueba de corto plazo se aplicó entre 1 minuto y 10 minutos un nivel de descarga de entre 20.000 y 50.000 pC.

Tras la finalización de la prueba de DP se observó que la superficie había sufrido una decoloración, así como un cambio en su interior.

En la ilustración 23 podemos observar la configuración de la prueba de tensión tipo rayo. Las muestras de pressboard obtenidas tras el ensayo de descarga parcial se volvieron a impregnar de aceite durante unas 72 horas.

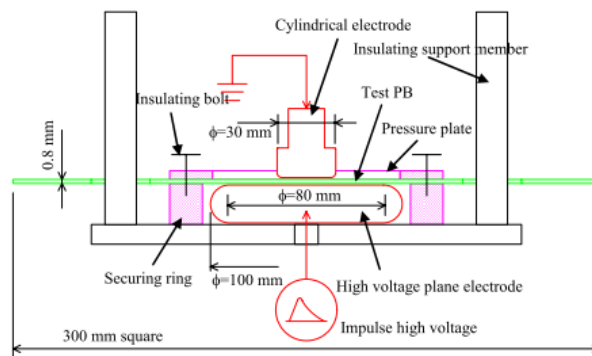


Ilustración 23: Configuración para ensayo tipo rayo.
Tomada de [20].

Cuando se observó el pressboard tras el impacto de las descargas parciales, se podía ver como para DP aplicadas en un tiempo mayor a 10 minutos aparecía un punto negro o una ramificación justo donde estaba el electrodo de punta. El nivel de decoloración del material es similar a cuando se trata de descargas con un nivel de 10.000 pC o menos, independientemente del tiempo de duración de las mismas.

Cuando se observó con el microscopio se encontró un patrón en forma de árbol, que era equivalente a la zona en la que se había provocado la decoloración. Los patrones se corresponden a lo marcados en la siguiente gráfica:

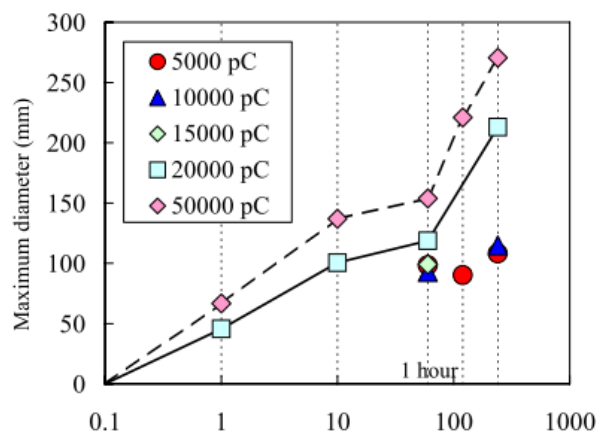


Ilustración 24: Relación voltaje-patrón de superficie decolorada.
Tomada de [20].

Como se puede deducir, lógicamente, cuanto mayor es el tiempo de la descarga, o mayor la intensidad de la misma, también es mayor la superficie dañada.

Los gases que se producen a causa de la descarga parcial permanecen dentro del pressboard debido a que las fibras que forman el material aislante los bloquean sin permitir su difusión. Este fenómeno provoca que la mayor parte del aceite que está impregnado en el pressboard se desprenda, y el que queda sea con una rigidez dieléctrica baja. Como se ha dicho anteriormente cuanto mayor es la intensidad de la descarga, mayor será el tiempo de aplicación, mayores serán los daños, por lo que la decoloración del material aumentará ya que se puede decir que es proporcional a la cantidad de aceite que se desprende.

Se puede concluir sobre el ensayo de las descargas parciales, que para DP menores a 10.000 pC la zona en negro es muy pequeña, mientras que si hablamos de descargas mayores a 20.000 pC, la zona afectada es mucho mayor.

Aplicación de sobretensiones de tipo rayo en el pressboard:

A continuación se realizaron cinco pruebas sobre pressboard con diferentes niveles de degradación como se puede ver en la tabla 4. Se aplicó una tensión de polaridad positiva para medir la tensión de ruptura y el valor medio de cada una de las pruebas. La tensión tipo rayo tiene la siguiente evolución en el tiempo.

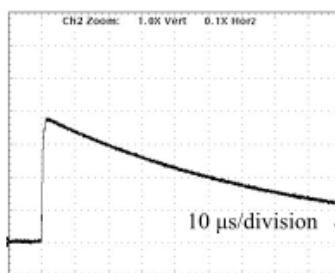


Ilustración 25: Evolución en el tiempo de la tensión tipo rayo. Tomada de [20].

Se caracteriza por una fuerte subida de tensión en muy poco tiempo, pero si el material aguanta esta subida, la tensión va disminuyendo poco a poco. Sin embargo si se produce una ruptura, es decir, que el material no soportara esta tensión, la evolución de la tensión será la siguiente:

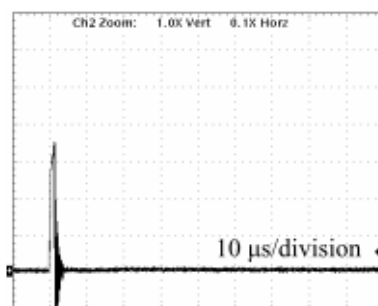


Ilustración 26: Tensión tipo rayo cuando se produce ruptura. Tomada de [20].

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados obtenidos en la prueba de tensión tipo rayo para los materiales anteriores, como para un pressboard nuevo:

Descarga Parcial	Tiempo Aplicación	Tensión de Ruptura [kV]						
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Media
5000 pC	1 h	85	100	90	95	105	90	95
	2 h	95	100	100	100	105	100	100
	4 h	80	110	105	90	115	100	100
10000 pC	1 h	90	105	95	120	90	100	100
	2 h	110	100	95	105	100	102	102
	4 h	90	110	85	70	105	92	92
15000 pC	1 h	80	85	105	100	105	95	95
20000 pC	1 min	90	95	90	95	110	96	96
	10 min	75	85	105	90	95	90	90
	1 h	80	85	60	90	80	79	79
	4 h	45	95	50	75	60	65	65
50000 pC	1 min	95	110	85	90	80	92	92
	10 min	90	80	75	70	80	79	79
	1 h	70	50	100	50	85	71	71
	2 h	45	55	90	60	85	67	67
	4 h	40	45	35	35	75	45	45
Nuevo		105	100	95	90	100	100	100

Tabla 4: Resultados de la tensión de ruptura.

Resultados experimentales:

1. Descargas parciales de 5000 pC: Como podemos ver para este nivel de descarga, las tensiones de ruptura obtenidas con muy parejas a las del material nuevo, por lo que podemos decir que no sufre casi ningún daño.
2. Descargas parciales de 10000 pC: como en el caso anterior, la tensión de ruptura es prácticamente igual que al del material nuevo menos en un caso en el que la tensión de ruptura disminuye hasta los 70 kV, porque se produjo la ruptura en la zona de decoloración negra.
3. Descargas parciales de 15000 pC: para este caso tampoco hubo ningún caso que sobresaltara por disminuir mucho la tensión, por lo que podemos decir que para este valor y para valores más pequeños que este el aislante, no sufrirá grandes daños.
4. Descargas parciales de 20000 pC: la tensión media ha disminuido, sobre todo cuanto mayor era el tiempo de aplicación de la misma. Para tiempos de aplicación de 1 y 10 minutos la ruptura se produce en la zona más decolorada.
5. Descargas parciales de 50000 pC: En este caso la tensión media empezó a bajar incluso para tiempos de aplicación de 1 minuto.

4.4.3. Ensayo de Pressboard sometido a altas temperaturas.

En [21] se realizó un experimento en el que se simuló una situación de sobrecarga en el aislamiento de un transformador cuando la temperatura es elevada. Para el experimento se estudiaron diferentes parámetros que se definen a continuación:

1. Descarga máxima: Se expresa en picoculombios y viene dada por la siguiente expresión:

$$q_m = \max [q_1, q_2, q_3 \dots q_n]$$

2. Descarga media: Se define como la relación entre la suma de la magnitud de descarga medida y el número total de pulsos de DP registrados. Se expresa en picoculombios:

$$q_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

3. Tasa de repetición: Se define como la relación entre el número total de impulsos de DP en un intervalo de tiempo y la duración de este intervalo [33].

$$r = \frac{n}{T}$$

4. Desviación estándar: Se define como la variabilidad de la distribución de la descarga alrededor de su valor medio. Se calcula para medio ciclo, con la siguiente expresión [33]:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_n)^2 \cdot f(q_i)}{\sum_{i=1}^n f(q_i)}$$

Configuración experimental

Se realizó en una celda de vidrio en la que se introdujo el pressboard impregnado en aceite. Esta celda se calentó hasta conseguir la temperatura máxima de la prueba que estuvo en torno a 80-85 °C. Tras este aumento, y habiendo tomado los resultados pertinentes se deja enfriar de forma natural hasta los 23-25 °C [21], [33].

El aislamiento que se ha llevado a estudio tiene tres componentes. En primer lugar 10 capas de papel kraft cada uno de 0,06 mm de espesor. Adyacente al papel kraft se han situado dos capas de 0,25 mm de espesor de papel crepe. El tercer componente es una capa de 3 mm de espesor de pressboard.

La tensión que se aplicó al aislamiento fue de 10 kV. Los resultados obtenidos eran registrados en un ordenador. En la ilustración 27 podemos ver la configuración del circuito de medida [21], [33].

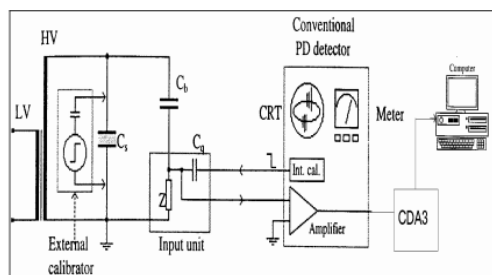


Ilustración 27: Circuito de medida y toma de resultados. Tomada de [21]

El experimento realizaba una combinación de estrés eléctrico y térmico. En el inicio de la prueba la temperatura se elevó hasta los 80-85 °C. Como su puede ver en la ilustración 28 cuando la temperatura alcanzó los 60 °C la magnitud de pico en el semiciclo positivo fue mayor que en el negativo [21].

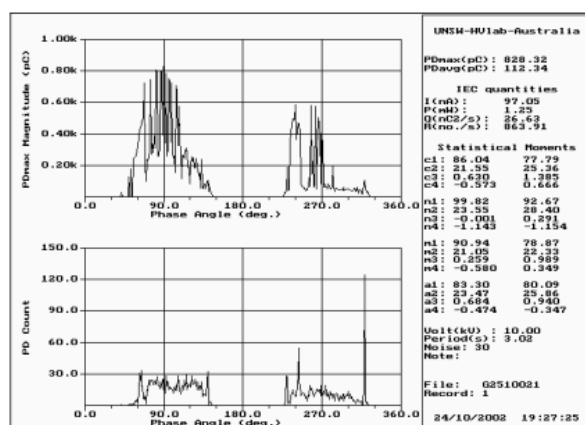


Ilustración 28: Magnitud de descarga parcial en el aumento de temperatura. Tomada de [21]

En el intervalo de temperatura 60-70 °C (ilustración 30) vemos como la tasa de repetición aumento de una manera rápida. A medida que aumento la temperatura límite, el comportamiento de la DP varió y aparecieron picos más grande en el semiciclo negativo, que en el positivo (ilustración 29).

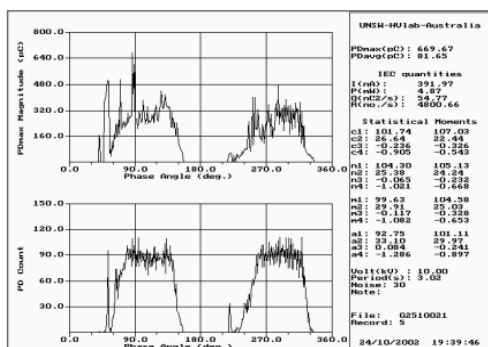


Ilustración 30: DP producidas a 70 °C. Tomada de [21]

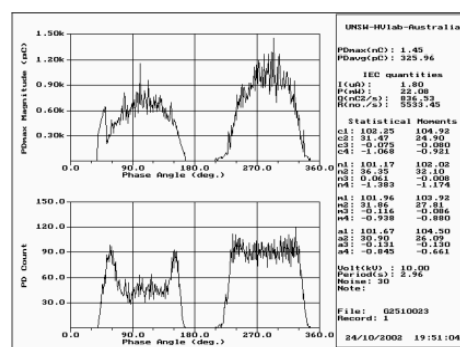


Ilustración 29: DP producidas a 81 °C. Tomada de [21]

Tras la obtención de estos resultados se ha recopilado más información, en el proceso de enfriamiento natural de la celda de vidrio. En el caso en el que la temperatura baja de los 85-80 °C. no varía nada con respecto al caso de calentamiento.

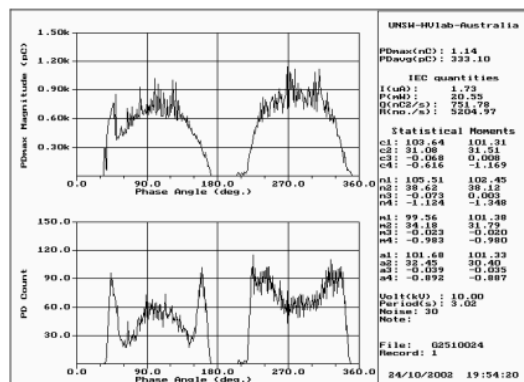


Ilustración 31: DP producidas a 80 °C.
Tomada de [21]

Cuando la temperatura se redujo hasta los 60 °C. el mayor pico de descarga parcial que se produce vuelve a ser en el semiciclo positivo. La tasa de repetición con el aumento de la temperatura también aumenta. Por otro lado cuando la temperatura ha disminuido, esta también disminuyó, como se ve en las siguientes ilustraciones de la distribución de DP a 60 °C y 70 °C.

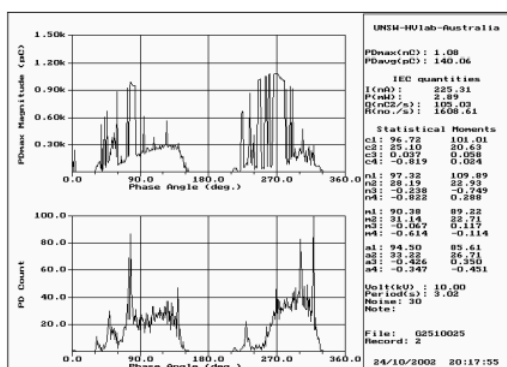


Ilustración 33: DP producidas a 70 °C.
Tomada de [21]

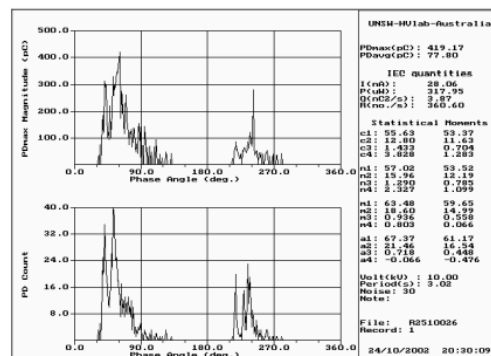


Ilustración 32: DP producidas a 60 °C.
Tomada de [21]

Conclusiones:

En el inicio del ensayo la máxima DP ocurrió en el semiciclo positivo, pero según se iba aumentando la temperatura esta cambió al semiciclo negativo. Durante el proceso de enfriamiento las descargas parciales vuelven a aparecer en el semiciclo positivo, y se observa como estas disminuyen en número. El color del aceite se oscurece debido al estrés térmico. La máxima DP surge con el calentamiento del aceite, y disminuye con su enfriamiento

4.5. Ensayos de DP sobre aislantes líquidos

A. Comparación del patrón de DP en Aceite vegetal y en Aceite mineral.

En [27] se realizó un estudio para comparar el comportamiento del aceite mineral, aceite de colza y aceite de colza modificado. Esta modificación se conseguía tratándolo con aceites minerales.

Para este estudio se usó la geometría punta-plano explicada anteriormente. Las pruebas se realizaron con una separación entre el electrodo y el aceite de 3 y 4 mm. La tensión que se aplicó a 50 Hz fue aumentando hasta que se encontró la tensión de ruptura. Para comprobar el efecto de la humedad en cada tipo de aceite, se añadieron dos gotas de agua en cada una de las muestras. Para determinar las propiedades de las DP se tomaron muestras, tanto del aceite húmedo como del aceite seco. A partir de esta tensión fue de la cual se partió para realizar el experimento. Los resultados los podemos ver en las siguientes tablas:

Aceite Mineral		
Separación	Tensión de ruptura [kV]	DP [pC]
3 mm.	6	66
	7	67
	9	72
	11	73
4 mm (húmedo).	1	89
	2	85

Tabla 5: Resultados para el aceite mineral.

Aceite de Colza		
Separación	Tensión de ruptura [kV]	DP [pC]
3 mm.	7	7
	9	9
	10	8
	12	8
4 mm (húmedo).	1	110
	2	189

Tabla 6: Resultados para el aceite de colza.

Aceite de Colza tratado		
Separación	Tensión de ruptura [kV]	DP [pC]
3 mm.	8	6
	10	6
	12	6
4 mm (húmedo).	1	24
	2	19
	7	6
	12	7
	17	7

Tabla 7: Resultados para el aceite de colza modificado

Cuando se comparan ambos aceites vegetales con el aceite mineral en estado seco, se ve que aparece mayor número de descargas en el aceite mineral. Los dos tipos de aceites vegetales, dan unas propiedades de DP muy similares.

Para el caso de los aceite con humedad, el aceite mineral no cambia prácticamente su valor de DP, de 70 a 85 pC respecto al aceite seco. Sin embargo en los aceites vegetales al ser hidrófilos, el nivel de descargas parciales aumenta mucho al aumentar la humedad, variando desde 10 a 190 pC

B. Descargas Parciales en aceite de BIOTEMP

El aceite BIOTEMP, fabricado por ABB, es un tipo de aceite vegetal que se obtiene a partir de semillas de girasol. Es uno de los aceites vegetales más estables y que presentan unas buenas propiedades dieléctricas. No contiene ningún elemento que pueda perjudicar al medio ambiente como halógenos, siliconas o derivados del petróleo. Tiene una rigidez dieléctrica superior al del aceite mineral, en torno a los 48 kV. Otra de sus cualidades es que tiene un punto de inflamación muy elevado, lo que le hace ser muy seguro para instalaciones a altas temperaturas. Uno de sus inconvenientes es su alta viscosidad, lo que hace que no disipe muy bien el calor [23], [25].

En [23] se ha llevado a cabo un estudio acerca del comportamiento de este tipo de aceite ante descargas parciales. Para este ensayo se ha utilizado la ya conocida configuración punta-plano. La separación del electrodo punta, con el plano será de 4 mm.

El voltaje que se aplicó fue aumentando desde el valor en el que empieza la primera DP. En la siguientes ilustraciones se ve como la tensión inicial que se aplicó fue de 6,8 kV producía DP en fase negativa, mientras que para una tensión de 7 kV, las DP, aparecían en ambos casos.

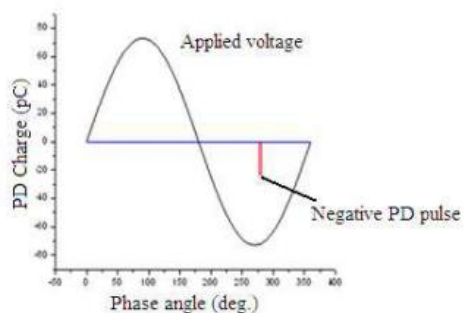


Ilustración 34: Tensión aplicada de 6,8 kV.
Tomada de [23]

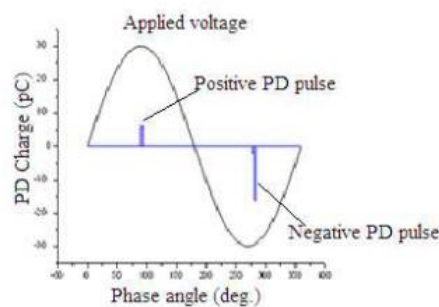


Ilustración 35: Tensión aplicada de 7 kV.
Tomada de [23]

Tras observar este fenómeno se aplicó una tensión de 7 kV, 8kV y 8,5 kV. En las siguientes ilustraciones se pueden ver los resultados para cada una de las tensiones aplicadas. Se puede observar como para un ángulo de fase de 90° las DP eran positivas, y para un ángulo de fase de 270° son negativas. Se puede comprobar cómo según se aumenta la tensión aplicada el nivel de pC también aumenta.

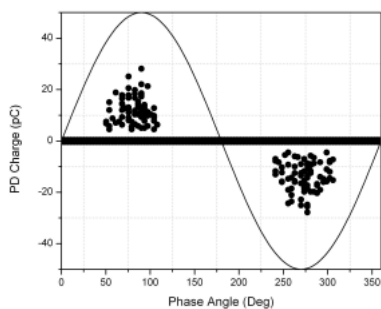


Ilustración 37: Tensión aplicada de 7 kV.
Tomada de [23]

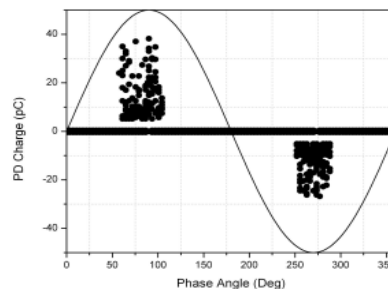


Ilustración 36: Tensión aplicada de 8 kV.
Tomada de [23]

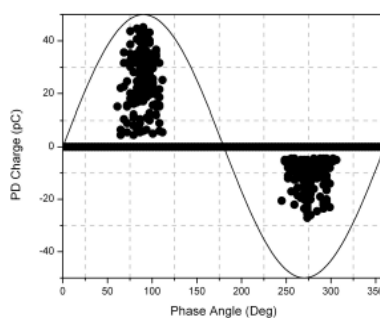


Ilustración 38: Tensión aplicada de 8,5 kV.
Tomada de [23]

Tras la conclusión del ensayo se puede decir que el número de descargas parciales es proporcional al nivel de pC de las mismas [25].

4.5.1. Descargas Parciales en Aceite de Palma.

Muchos investigadores están trabajando en lo que se ha expuesto anteriormente, ya que como se ha dicho, se necesitan alternativas fiables al aceite mineral. Una de estas alternativas es el aceite de palma. Según las investigaciones llevadas a cabo en [26], este aceite vegetal puede ser una clara alternativa en equipos de alta tensión. En la siguiente tabla se muestran las propiedades físicas y químicas del aceite de palma.

Propiedades	
Tensión de ruptura	≥ 57
Factor de disipación del calor (%)	0,03
Permitividad relativa	3,1
Viscosidad (40 °C)	21,02
Viscosidad (100 °C)	3,22
Número de neutralización [mg KOH/g]	0,074
Contenido en agua [ppm]	60

Tabla 8: Propiedades del aceite de palma.

A partir de este aceite se ha hecho un ensayo en el que se compara con el aceite mineral. La configuración y los resultados del mismo son los siguientes:

En este ensayo como en el resto que se han expuesto en el trabajo, se ha usado una configuración punta-plano, ya que nos proporciona un mayor campo eléctrico. La configuración utilizada para este ensayo es la siguiente:

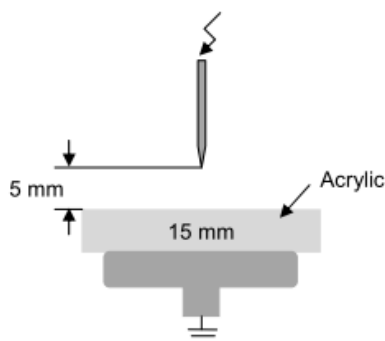


Ilustración 39: Configuración punta-plano. Tomada de [30].

La tensión utilizada en el experimento es de tipo alterna. El valor varía en función del tiempo de aplicación siguiendo la siguiente ecuación [26]:

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

Donde:

$v(t)$ es el valor de la tensión en función del tiempo.

V_m es el valor de la tensión aplicada.

ω es la frecuencia angular.

t es el tiempo.

La separación entre los electrodos de punta y plano, fue de 20 mm. y el electrodo de punta tenía un 0,01 mm. de radio y está formado por acero.

Resultados:

La tensión con la que empezaron a aparecer descargas parciales, es de 16,2 kV. Para esta misma configuración, pero usando aceite mineral nos dio una tensión de 14 kV.

Para unas tensiones aplicadas de 18 kV, 25 kV y 32 kV, en el aceite de palma, la magnitud de la descarga parcial no varía como se puede observar en las siguientes ilustraciones.

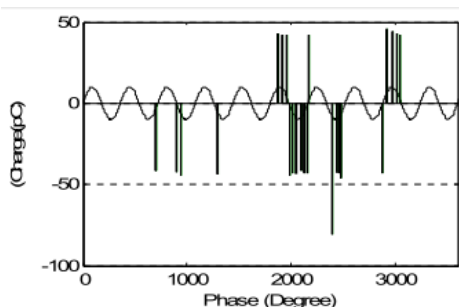


Ilustración 41: DP en aceite de palma para una tensión aplicada de 18 kV. Tomada de [26].

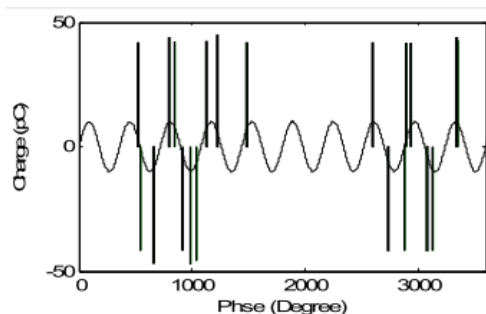


Ilustración 40: DP en aceite de palma para una tensión aplicada de 25 kV. Tomada de [26].

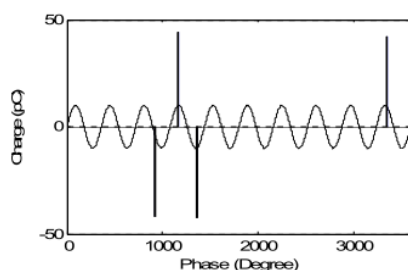


Ilustración 42: DP en aceite de palma para una tensión aplicada de 32 kV. Tomada de [26].

Como muestran las ilustraciones anteriores para los tres valores de tensión aplicada la magnitud de la DP es igual, salvo en el caso de 18 kV, que aparece una DP con un valor mayor a los anteriores, pero no es de importancia, ya que solo es un caso aislado.

Para una tensión de 18 kV la primera descarga aparece en el semiciclo negativo, si se aplican 25 kV se observa que la primera descarga ocurre en el semiciclo positivo. Pero cuando la tensión aumenta a los 32 kV se observa nuevamente que la primera descarga se obtiene en el semiciclo negativo.

En las siguientes ilustraciones se muestra el mismo experimento, pero realizado con aceite mineral. Podemos ver que en este caso, la primera DP siempre aparece en el semiciclo negativo.

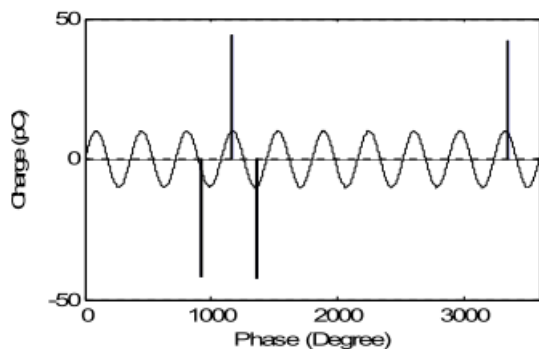


Ilustración 44: DP en aceite mineral para una tensión aplicada de 20 kV. Tomada de [26].

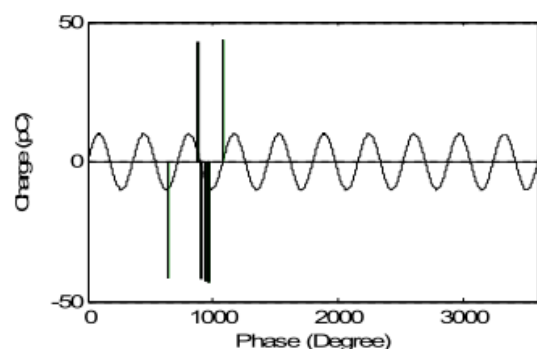


Ilustración 43: DP en aceite mineral para una tensión aplicada de 25 kV. Tomada de [26].

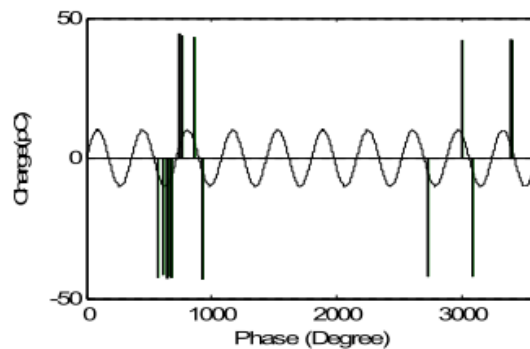


Ilustración 45: DP en aceite mineral para una tensión aplicada de 30 kV. Tomada de [26].

4.5.2. Descargas Parciales en Esteres.

En [22] y [24] han realizado un experimento de comparación del éster sintético, natural (aceites vegetales) y aceite mineral.

El estudio se ha realizado como en otras ocasiones con una configuración punta-plano, usando dos distancias de 10 mm y 40 mm. Se realizaron 4 pruebas diferentes:

- 1) Pressboard impregnado y sumergido en aceite mineral.
- 2) Pressboard impregnado y sumergido en aceite vegetal.
- 3) Pressboard impregnado y sumergido en éster sintético.
- 4) Pressboard impregnado en éster sintético y sumergido en aceite vegetal.

La siguiente ilustración muestra un ejemplo de la configuración:

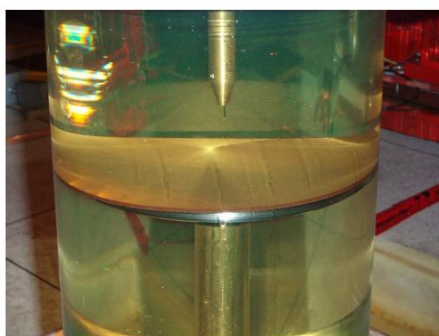


Ilustración 46: Ejemplo de la configuración para el experimento. Tomada de [24].

Los resultados que se obtuvieron para las dos distancias en el caso de aceite mineral, fue de un nivel muy bajo de descargas parciales (como se esperaba). En los demás casos el nivel fue superior, especialmente en el caso de pressboard impregnado con éster sintético y sumergido en vegetal. Comparando los ensayos de éster sintético y de éster natural, se dedujo que había menos actividad de DP en los naturales.

5. MEDIDA DE LAS DESCARGAS PARCIALES.

Para medir las DP en transformadores se usan los métodos establecidos en las normas UNE-EN 60270 y IEC 62478. Las DPs se pueden detectar bien por medios eléctricos (sensores monitorizados de corriente de frecuencia que permiten ver la corriente de los conductores de los equipos) o por medio no eléctricos (monitorización acústica de las perturbaciones ultrasónicas). Los métodos de detección se basan en registrar las consecuencias de la aparición de descargas parciales [14]:

- Pulsos de corrientes eléctricas.
- Perdidas dieléctricas.
- Radiación ultra-violeta y rayos X
- Radiofrecuencia
- Ruido
- Reacciones físico-químicas (disolución de gases)

Los fenómenos físicos que ocurren cuando aparecen las descargas parciales se clasifican en la ilustración 47. En dicha ilustración también se incluyen los métodos de detección que se pueden emplear para detectar dichos fenómenos físicos, y en consecuencia las descargas parciales que los han originado. [34]:



Ilustración 47: Método de detección de DPs. Tomada de [34]

5.1. Técnicas de Medida Eléctricas.

El principal método de medida son las técnicas eléctricas. Sus características están definidas en la norma IEC 60270 y están basados en medir los pulsos de corrientes producidas en las DPs mediante circuitos eléctricos de medida [3].

Los circuitos empleados en la detección de las DPs son los siguientes:

- Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el condensador de acoplamiento.

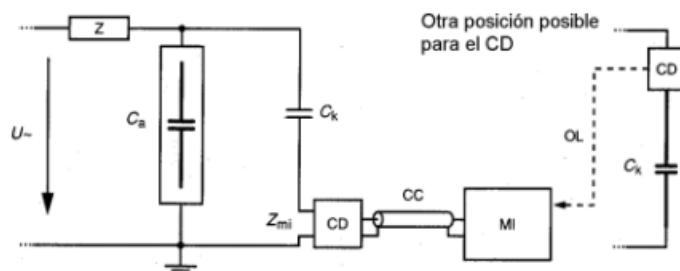


Ilustración 48: Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el condensador de acoplamiento. Circuito Indirecto de detección. Tomada de [2]

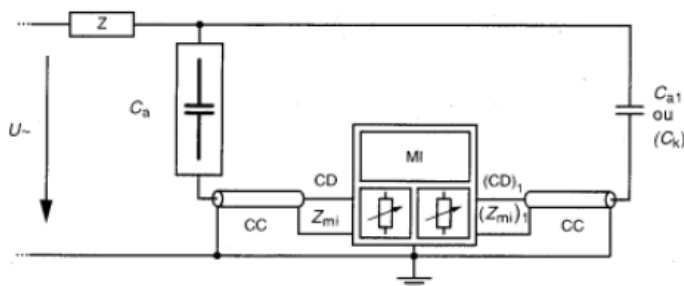


Ilustración 49: Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el objeto de ensayo. Circuito Directo de detección. Tomada de [2]

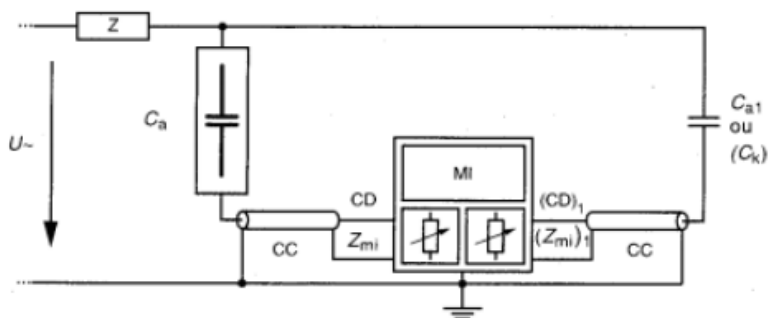


Ilustración 50: Esquema de circuito equilibrado (Puente equilibrado). Tomada de [2]

Los principales elementos que componen las configuraciones son [3]:

- Una fuente de alta tensión, preferiblemente libre de interferencias.
- Una impedancia filtro Z_n , que reduce las perturbaciones generadas en la fuente y asimismo impide que los pulsos de DP pasen a ésta.
- El objeto de prueba o espécimen, cuyo comportamiento se aproxima a una capacidad C_a .
- Un condensador de acoplamiento C_k , que facilita el paso de los pulsos de corriente de alta frecuencia.
- Una impedancia de medida Z_m (cuadripolo), a través de la que va a fluir el pulso de la DP.
- Un instrumento de medida de DP

5.2. Técnicas de Medida No Eléctrica.

Las técnicas de medida no eléctrica están contempladas en la norma IEC 62478. A continuación se explica cada una de ellas [14].

1. Detección acústica o mecánica: Este tipo de técnica se realiza mediante un micrófono o un transductor acústico. Entre sus principales ventajas está que es muy rápido y económico. También permite la medida en campo, y no es un método intrusivo. Su desventaja es la atenuación propia del aceite de los transformadores de potencia y la reflexión del sonido internamente lo que dificulta la localización del fenómeno [15].



Ilustración 51: Detector acústico de medida de ultrasonidos

2. Detección visual u óptica: Para llevar a cabo este tipo de técnica es necesario el uso de fibra óptica y cámaras ultravioletas. Su principal desventaja es ser un método intrusivo [1], [3], [15].
 - Fibra óptica: Su mayor inconveniente es que la luz de la DP parcial debe incidir en el extremo captador con un determinado ángulo de incidencia mínimo.

- Fibra fluorescente: El flúor de su interior se iluminaría al incidir un DP independientemente del ángulo de incidencia.

3. Detección Química: Se basa en el análisis de gases y compuestos en el aceite. Como ventaja es la posibilidad de obtener una muestra y analizarla en un laboratorio químico sin retirar el servicio. Su desventajas son la no identificación y localización del fenómeno, sólo su presencia, su incertidumbre asociada.

5.3. Ejemplos de Técnicas de Medida

A continuación se detallan una serie de experimentos realizados, para comprobar la funcionalidad de cada una de las técnicas de medida.

5.3.1. Técnica de medida UHF

Es una técnica de medida on-line, que se basa en la recepción de los sensores UHF de las ondas electromagnéticas radiadas por la fuente de descarga con un rango de frecuencia de hasta los 3GHz. Estos sensores se encuentran montados en la cuba del transformador, y debido a que el metal con el que está hecha la cuba no permite la propagación al exterior de las ondas electromagnéticas se crean aberturas en las tapas de escotillas para poder medir la señal de la DP. Estas aberturas están cubiertas con una ventana dieléctrica (Ilustración 52) [30].

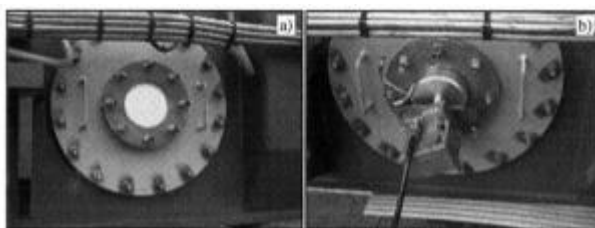


Ilustración 52: Ventana dieléctrica en la tapa de la escotilla de un transformador. b) Sensor de UHF con un amplificador montado en la ventana dieléctrica del transformador.

Una de las características más importantes de esta técnica de medida es que la señal captada por el sensor UHF se mide con un analizador de espectro, lo que provoca que se distinga muy bien del ruido. El analizador de espectro se usa para hacer un barrido de las distintas señales que capta, y para conseguir un patrón de descargas. Se puede decir que el analizador se usa como un filtro sintonizable de banda estrecha, con un ancho de banda de 3MHz. La frecuencia del analizador está fijada a una cierta frecuencia central que se establece mediante la frecuencia de medición requerida.

El margen de medición del analizador se ajusta a cero mediante la opción de amplitud cero. El tiempo de barrido será de 20 ms, y la duración de un periodo de la onda sinusoidal de 50 Hz. Este tiempo de barrido esta sincronizado con la frecuencia de la tensión aplicada por medio de un impulso de disparo. Con esta técnica se obtiene el patrón de DP en relación a la onda de 50 Hz y que a su vez es comparable a los patrones obtenidos en la norma IEC 60270 [30].

En [31] se presenta un estudio experimental sobre la medida de descargas con sensores UHF. El experimento se realizó a un transformador de un 1MVA (ilustración 53). El propósito de este experimento es la construcción de una base de datos con los defectos más comunes que pueden ocurrir durante la vida de un transformador. Para llegar a este fin se ha tenido que generar un cierto número de patrones de defectos artificiales en el interior del transformador [31].



Ilustración 53: Transformador (1MVA) con abertura en la parte superior. Las áreas blancas del círculo indican los lugares donde los sensores UHF se encuentran. Tomada de [31]

Los modelos preparados y diseñados de descargas parciales fueron los siguientes:

- Descarga interna
- Descarga superficial
- Descarga de efecto corona en el aceite.

El procedimiento de medición para cada uno de los defectos son los siguientes:

- Aumento de la tensión de 0 kV hasta la tensión de inicio de la DP
- Aumento de la tensión hasta un nivel por debajo de la tensión de ruptura para hallar un patrón de cambio de la frecuencia.
- Grabación de los espectros de frecuencia en todos los niveles de tensión.

A. Descarga interna.

Este tipo de descargas se pueden producir por una mala puesta a tierra o por la presencia de pequeñas piezas metálicas. Estas piezas no tienen un potencial definido y esto es lo que provoca las descargas.

Estas descargas se producen en el hueco entre dos partes conductoras produciendo la erosión del material, cambios químicos, y la carbonización. Para este modelo de DP se ha utilizado dos electrodos de latón fundido donde la cavidad se encuentra en medio de ambos (ilustración 54), la cavidad tenía un diámetro de 3mm.



Ilustración 54: Modelo de descarga interna.
Tomada de [31]

Para este prototipo se aplicaron dos tensiones. La primera tensión aplicada fue de 14 kV para la cual los resultados obtenidos fueron unos impulsos de descarga que oscilaron entre 11 nC a 15 nC. Los pulsos eran estables y no desaparecieron durante los siguientes 20 minutos.

La siguiente medida fue con una tensión aplicada de 18 kV. En este caso los impulsos de la DP variaron de 11 nC a 20 nC. Los pulsos eran estables pero se producían picos muy altos aleatorios. La amplitud máxima de estos pulsos fue de 38 kV y estaba cerca de la gama de voltaje de ruptura de 25 kV.

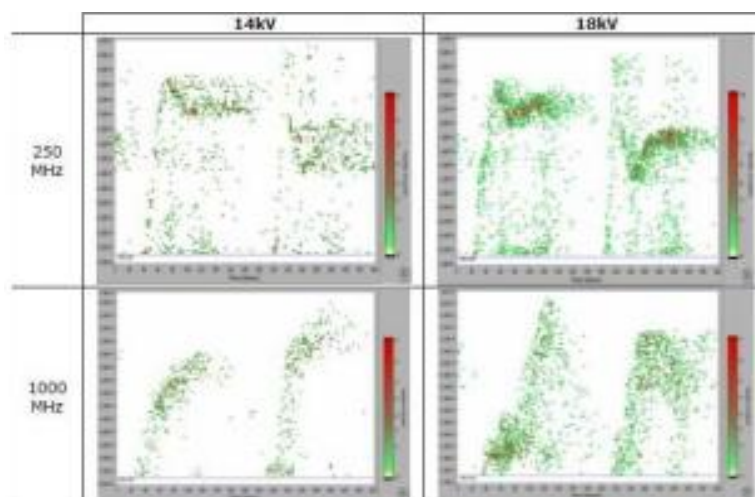


Ilustración 55: resultado del experimento para cada una de las tensiones. Tomada de [31]

Los patrones obtenidos fueron muy parecidos a los hallados en la norma IEC 20270.

B. Descarga superficial.

Este tipo de descarga parcial aparece a causa de un fuerte estrés en la componente paralela a la superficie dieléctrica. Debido a este tipo de DP puede producirse un importante deterioro en la superficie del material aislante y puede producir diferentes tipos de productos químicos, como ozono o ácido nítrico, que también son perjudiciales para el aceite. Para la realización del experimento en el laboratorio se llevó a cabo la configuración mostrada en la ilustración 56 [31].



Ilustración 56: Experimento de descarga superficial.
Tomada de [31]

La intención de esta configuración fue crear un alto campo eléctrico en la superficie de cartón prensado. En un primer momento se aplicó una tensión de 16 kV y se realizó la medición. Para este rango de tensión la amplitud máxima de las descargas fue de 2,2 nC. Tras 10 minutos las descargas desaparecieron y el voltaje se aumentó a 18,4 kV y los pulsos de descarga variaron entre 1,4 y 2,4 nC. Tras un breve periodo de tiempo la tensión se volvió a aumentar (25 kV y 34 kV) y se observó que variaba muy poco la amplitud de la descarga. Los patrones obtenidos son los siguientes:

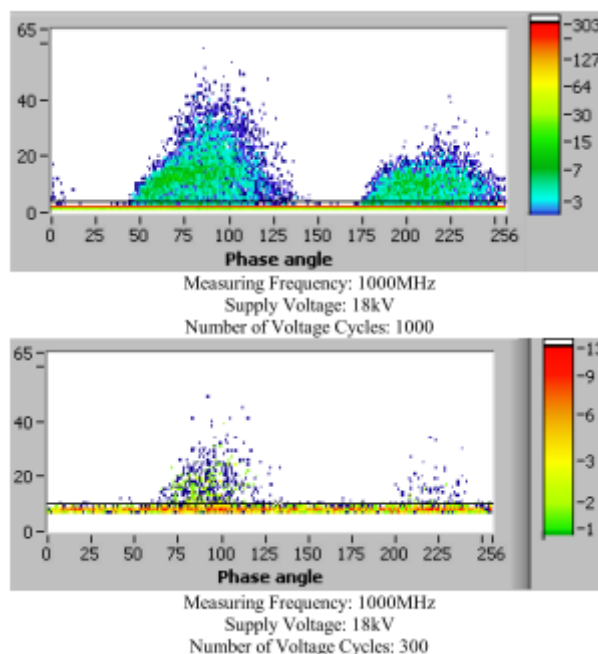


Ilustración 57: Patrones de DP. Tomada de [31]

C. Descarga de efecto corona.

Las descargas de efecto corona, pueden aparecer en los transformadores debido a la contaminación causada por pequeñas partículas conductoras. Estas partículas se originan en el proceso de fabricación de la cuba. Para la reproducción de descargas de efecto corona se creó un electrodo como el que podemos ver en la ilustración 58 [35].



Ilustración 58: Configuración para simular DP de efecto corona. Tomada de [31]

La tensión aplicada fue de 18,5 kV con un rango de amplitud de pulso de entre 1nC y 3nC. Los pulsos no eran estables y desaparecieron de vez en cuando. Tras aumentar el nivel de tensión a 35 kV, la magnitud de la descarga se encuentra entre los 8nC y los 11 nC. Los pulsos se mantienen estables. Por último, se aplicó una tensión de 40 kV y los pulsos de descarga fueron de entre 12 nC y 16 nC [31].

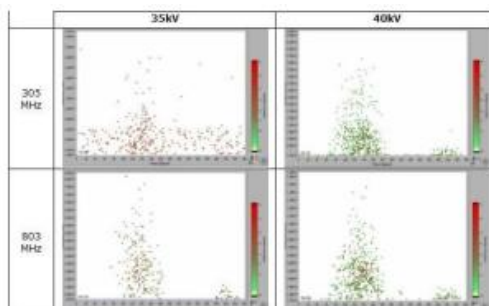


Ilustración 59: Resultados para la prueba de DP de efecto corona. Tomada de [31]

Los resultados obtenidos con la técnica de medida UHF son muy parecidos a los obtenidos con la norma UNE-60270. Los patrones obtenidos de cada uno de los tipos de defectos son diferentes lo que hace que sea posible distinguir distintos defectos y proporciona información de cada uno de ellos. Los espectros de frecuencia para cada tipo de DP son diferentes también, lo que proporciona información acerca de la tasa de repetición de cada uno de ellos.

5.3.2. Técnica de medida acústica

Es una técnica de detección y localización de descargas parciales mediante la emisión acústica de las mismas.

Las ondas generadas por las DP se propagan a través del aceite, golpeando las paredes del tanque que lo contiene, donde se colocan los sensores. Para este tipo de técnica se usan sensores piezoeléctricos con baja amortiguación y alta sensibilidad a la resonancia. Se mide con un ancho de banda entre los 100 y 400 kHz. En el sensor se deberá colocar un amplificador de 40 dB para mejorar la señal de ruido.

En [29] se llevó a cabo en el laboratorio fueron para determinar si el sistema era capaz de detectar la DP con exactitud.

Las pruebas en el laboratorio se llevaron a cabo en un tanque metálico lleno de aceite. Las descargas parciales variaron entre los 100 pC y los 15.000 pC. La configuración del experimento se puede observar en la siguiente ilustración.

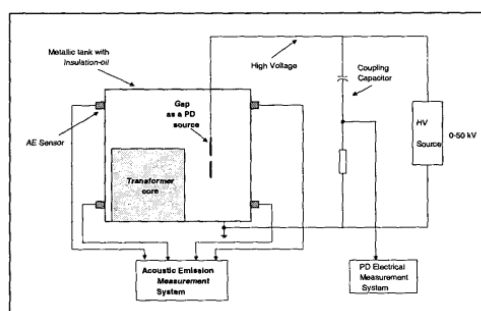


Ilustración 60: Circuito para la detección de DP con la técnica acústica.

En un primer momento el experimento se hizo con un total de seis sensores y se vio que el sistema era capaz de detectar la descarga parcial, pero no de ubicarla. Tras este fallido intento se colocó un sensor extra, siendo un total de 7 sensores. El sistema era capaz de detectar la ubicación de la descarga parcial, solo si había dos sensores a una distancia inferior a 50 cm de la fuente de la descarga. Por lo que se concluye que es muy importante conocer al detalle las paredes del transformador y colocar muy bien los sensores, aunque esto en algunas ocasiones es muy complicado debido al tamaño de los transformadores.

5.3.3. Técnica de medida ICT

En la actualidad se están mejorando los equipos y técnicas de medida y detección de las descargas parciales. Esta innovación se debe a la necesidad de encontrar una forma segura y barata de detectar estos fenómenos. En el siguiente punto se estudia una de estas formas: Information and Communication Technology (ICT). Es un tipo de técnica de detección de descargas parciales eléctrica [28].

Esta técnica se desarrolla mediante un laboratorio de ICT de alta tensión remoto (ICTRHVL). Este tipo de laboratorio cuenta con unas instalaciones que deben de tener un módulo de automatización, un detector de descargas parciales (tipo DTM) y un ordenador con el software PDGold ICT, que es capaz de reconocer detectar y valorar el patrón de DP. También será necesario internet para poder transmitir los datos.

En este tipo de métodos, lo difícil es distinguir entre el ruido y la descarga parcial, debido a su ancho de pulso corto que puede llevar a la falsa detección de la DP. Otro de los retos de la detección eléctrica es evitar la distorsión de las señales de DP en los diferentes componentes del equipo, desde que se propaga desde el origen hasta el punto de detección. Para solventar este tipo de dificultades se han usado una serie de filtros electrónicos, y del software PDGold [28].

El conjunto experimental que se ha necesitado para llevar a cabo el ensayo se compone de:

1. Electrodo punta-plano.
2. Condensador de acoplamiento.
3. Divisor de tensión.
4. Transformador de 50 Hz con una potencia de 150 kVA para energizar el electrodo.
5. Autotransformador.
6. Dispositivo de acoplamiento.
7. Detector de DP
8. Osciloscopio digital.

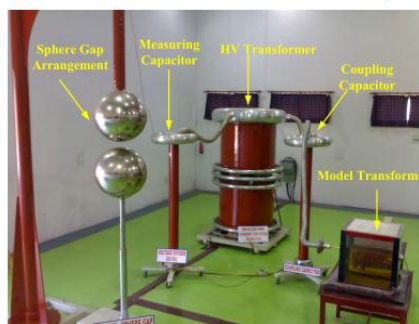


Ilustración 61: Composición de los equipos utilizados. Tomada de [28]

La distancia entre los dos electrodos es de 40 mm, con el fin de observar los fenómenos de las descargas. La calibración de la descarga se realiza mediante una fuente de tensión de 0-300 kV junto con un circuito computarizado y equipos de medición [28].

Los resultados que nos da este tipo de técnica se pueden observar en la siguiente ilustración.

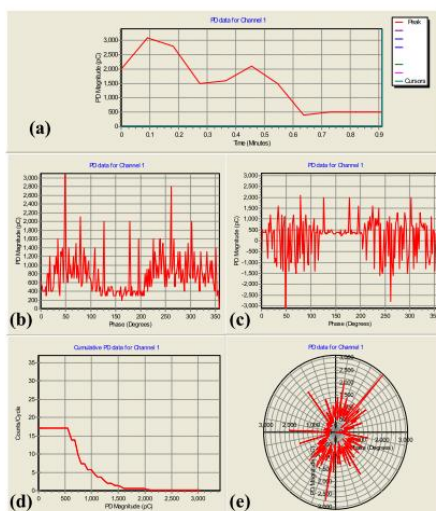


Ilustración 62: Resultados obtenidos para ITC. .
Tomada de [28]

En esta serie de gráficos podemos ver los siguientes resultados:

- Variación de la magnitud de la descarga parcial con el tiempo.
- Relación de la descarga parcial, con el ángulo de fase de la tensión aplicada.
- Representación lineal-bipolar de la magnitud de la descarga parcial y del ángulo de fase.
- Número de DP por ciclo.
- Representación polar de la DP durante 60 s.

5.4. Medida de DP en campo

Tal como se dijo anteriormente los fallos que pueden dar lugar a DPs en un transformador en servicio son los siguientes:

- Chispas causadas por un mal contacto
- Formación de gas que provoca un deterioro a largo plazo del aislamiento.
- Entrada de humedad debido a la falta de mantenimiento.
- La contaminación.
- Alta temperatura causada por el repentino aumento temporal de la carga.

El grupo de Cigreé dirigido por L. Lundgaard [13] hace una serie de recomendaciones acerca de la medida de las DPs de campo en transformadores. Estas recomendaciones son las siguientes:

- En la práctica es aconsejable que el nivel de DPs no sea mayor de unos cientos de pCs, ya que dependiendo del sistema de aislamiento puede llegar a ser peligroso.
- La tasa de repetitividad de los test de DPs es altamente dependiente de la intensidad y de la estabilidad.
- Solamente es posible la comparación de pruebas cuando se realizan con el mismo equipo y con los mismos sensores.
- Es muy importante suprimir el ruido para tomas medidas más exactas de DPs.

Algunas casas comerciales y autores proponen métodos de medida de DPs on-line. Estos métodos son algunos de los siguientes:

- Sensores UHF
- PDS100
- Radiofrecuencia
- DFA100
- IDD
- PD-GUARD

Alguno de los mencionados se ha expuesto anteriormente en los ensayos detallados. Los principales problemas asociados a las medidas on-line son:

1. Dificil acceso al material aislante, lo que provoca la obtención de un valor diferente al real.
2. La presencia de ruido provoca una detección de la DP errónea.
3. El carácter estocástico ya mencionado anteriormente.
4. Baja precisión a la hora de su ubicación.

5.5. Interpretación y clasificación

Como nos dice el investigador L. Lundgaard, en su artículo [12] es importante tener una forma de almacenar, clasificar e interpretar los datos obtenidos en las pruebas de DPs, para así tener un conocimiento de estas mejor.

Muchos defectos de DPs en transformadores tienen un patrón característico, por lo que es importante saber identificarlos. Si estos parámetros se almacenan junto con sus datos de medición será más fácil la comparación entre diferentes patrones.

Para que esto funcione es importante crear una base de datos de fácil acceso con un software en el que se puedan intercambiar datos. Durante mucho tiempo se ha usado las gráficas de dos dimensiones, como la mostrada en la siguiente ilustración, como clasificación de las descargas.

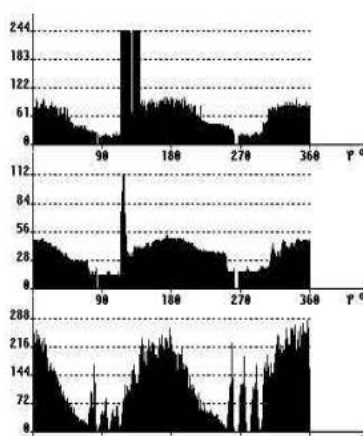


Ilustración 63: a) Descarga máxima en cada fase ($H_{qmax}(\varphi)$). b) Descarga media en cada fase ($H_{mean}(\varphi)$). c) Número de descargas en cada fase ($H_n(\varphi)$) . Tomada de [12]

En la actualidad se están usando gráficas de tres dimensiones en la que se muestra la magnitud de la DP y la intensidad con respecto al ángulo de fase. La magnitud se representa en el eje Y, el ángulo de fase en el eje X, y la intensidad dependiendo de la intensidad del color.

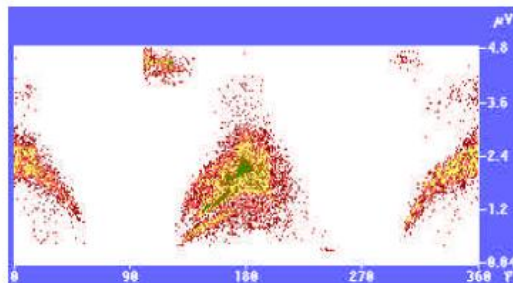


Ilustración 64: Ejemplo de gráfica 3-D.
Tomada de [12].

Posibles parámetros para la caracterización e identificación

Ciertos patrones de DPs pueden ser almacenados como los mostrados en la ilustración 69. Estos patrones se comparan con los obtenidos en la medida. Los patrones de referencia solo cubren la mitad de la fase, es decir 180 °. Esto se hace para reducir el número de patrones de referencia ya que nos pueden servir para describir tanto los del semiciclo positivo como los del negativo.

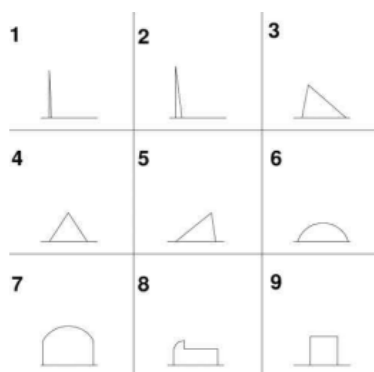


Ilustración 65: Patrones de
DPs. Tomada de [12].

Para la conclusión de un buen almacenamiento y clasificación de los mismos es necesario que junto con una gráfica como la mostrada en la ilustración 68, se cree una tabla con las características de cada patrón de DPs y del transformador en el que se realizó.

Una de las formas de almacenamiento y reconocimiento de DP es la explicada en el siguiente punto.

5.5.1. Redes Neuronales.

Una de las nuevas técnicas medida de DP en el aceite es con las llamadas redes neuronales (inteligentes). Como base de este estudio se produjo el estrés eléctrico alimentando los devanados del transformador con una tensión igual o superior a la nominal. El siguiente estudio se ha realizado a partir de tres muestras de aceite mineral [32].

Configuración experimental.

En [36] varios investigadores realizan un estudio de interpretación de DPs. El ensayo se ha llevado a cabo con el uso de electrodos con forma de semi-esferas sumergidas en el tanque del transformador. El electrodo de alta tensión se activa mediante el sistema Haefely Trench Type RSK, y la actividad de DPs se mide mediante el Haefely Trench TE571, que es un sistema de análisis de DPs.

Para este experimento se usan tres categorías de aceite:

- Aceite tipo 1: Aceite limpio con un bajo contenido en humedad y en contaminantes sólidos.
- Aceite tipo 2: Aceite con un contenido alto en humedad.
- Aceite tipo 3: Aceite con altos contaminantes sólidos.

Etiqueta del aceite	Descripción del Aceite
1	Aceite limpio (ppm de humedad, y 0,2% de contaminantes)
2	Alto contenido de humedad (60ppm)
3	Alto contenido en sólidos (1,3%)

Tabla 9: Tipos de aceites estudiados.

Para este ensayo se varió también la temperatura del aceite, simulando las posibles cargas que puede tener un transformador. Se han estudiado tres temperaturas diferentes, 30 °C (temperatura ambiente), 60 °C (carga nominal) y 80 °C (alta carga) [32].

Tras la obtención de los resultados de los ensayos se le introdujeron a una red ANN (Artificial Neural Network). Las redes ANN, son un modelo de redes inteligentes, a las que les podemos introducir una serie de datos y consignas que luego ellas saben representar. En este caso a esta red “inteligente” se le introdujeron los datos de los ensayos con los tres tipos de aceites con sus tres temperaturas diferentes. Cuando la red ANN tubo metidos todos los datos, era capaz de reconocer una muestra de aceite. En este caso se llegó a la conclusión de que era capaz de saber el estado del aislante con un porcentaje de fallo 0,88% [32].

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una recopilación bibliográfica sobre el fenómeno de las descargas parciales en transformadores.

Las descargas parciales son un fenómeno que se produce en los materiales aislantes de los equipos eléctricos.

Se ha realizado una descripción del fenómeno de las descargas parciales, distinguiendo entre las descargas superficiales, internas y efecto corona.

A continuación se ha hecho una descripción de los distintos aislante sólidos y líquidos empleados en los transformadores. Los aislantes sólidos más usados son el pressboard y el papel kraft impregnados en aceite.

Dentro de los aceites, el más usado históricamente es el aceite mineral, ya que es el que proporciona mejores propiedades, aunque en la actualidad se está tratando de mejorar las propiedades de los fluidos alternativos, para que en un futuro próximo se empiecen a usar con más frecuencia, ya que los aceites minerales son muy perjudiciales para el medio y además proceden del refinado del petróleo, que como se sabe antes o después se agotará.

Se han revisado aproximadamente 15 artículos técnicos pudiéndose extraer las siguientes conclusiones:

- Se ha visto como con un buen dimensionamiento del aislante es difícil que aparezcan las DP, ya que se producen por presencia de humedad o contaminantes, por altas temperaturas, etc.
- Las DP pueden provocar fallos graves a los aislantes y deben estar muy controladas.
- Los defectos que provocan las descargas parciales son la humedad, la contaminación con pequeñas partículas metálicas y la aparición de efecto corona.
- Cuando el aislante está envejecido a causa del efecto térmico se comprueba como aparecen más descargas parciales. Debido a la pérdida de sus propiedades dieléctricas.
- La presencia de descargas parciales, a su vez, provoca un deterioro de las propiedades dieléctricas de los materiales.
- Los distintos materiales que se pueden emplear para la fabricación de un transformador tienen un comportamiento distinto en lo referido a las DP.

Finalmente se han analizado diferentes técnicas de medida de DP, principalmente las contempladas en la norma UNE-60270. Se puede distinguir entre técnicas de medida eléctricas y no eléctricas, que se basan en la detección de la DP en función del ancho de banda de los sensores usados.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Norma UNE-EN 60270, *Técnicas de ensayo en alta tensión*. Medida de descargas parciales, Norma española, 2002.
- [2] MARTÍNEZ TARIFA, J. M., *Alta tensión*, Apuntes asignatura Alta Tensión Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [3] ROJAS MORENO, M.V., *Sensor de acoplamiento inductivo para la medida de pulsos de corriente de alta frecuencia para la medida y detección de descargas parciales*, Trabajo Fin de Master en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Junio de 2011.
- [4] ARDILA REY, J.A., *Sistema de adquisición de descargas parciales. Caracterización de fuentes de descarga y ruido por análisis de potencia espectral*, Trabajo fin de Máster en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Junio de 2012.
- [5] GOYAROLA, S., MARTÍNEZ, L., IZAGUIRRE, J., RODRIGO, A., KORTAJARENA, A. *Seminario sobre descargas parciales: sus conceptos y medida*. LABEIN, 1996.
- [6] DÍAZ GAUTIER, J.R. *Caracterización de defectos en sistemas de aislamiento mediante detección de descargas parciales*. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. 2002
- [7] TRASANCOS, J. G. *Instalaciones Eléctricas en Media y Baja Tensión*. ITP An Internacional Company. Madrid, 1999.
- [8] REQUENA, A., ZÚÑIGA, J.; *Apuntes de Espectroscopía*. Departamento de Química Física. Universidad de Murcia.
- [9] *Aceites de Transformador: Impacto del aceite aislante en la vida útil del transformador*. Conferencie Nynas Naphthenic. 2003.
- [10] Real academia de la lengua española, <http://www.rae.es/>
- [11] FRAILE MORA, Jesús, *Máquinas Eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill, 2003, Quinta edición. ISBN:84-481-3913-5
- [12] ALLAN, D., BLACKBURN, T.R., CONTIN, A., GOCKENBACH, E., LEMKE, E., LUNDGAARD, L., “Knowledge rules for partial discharge diagnosis in service”, Abri de 2003.
- [13] *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*. IEC-60270. International Electrotechnical Commission), 2000.
- [14] GONZÁLEZ GÓMEZ, A., *Estudio de los efectos de ondas cuadráticas sobre papel aislante impregnado en aceite: Tensión de rotura e inepción de descargas parciales*. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. 2011
- [15] *A prospective standard for acoustic and electromagnetic partial discharge measurement*, Institute of High Voltage Engineering and System Management, IEC-62478.

- [16] TABENERO GARCÍA, A., *Mantenimiento de los transformadores de potencia. Ensayos de campo*. Mayo de 2005. [Base de datos en línea] [Consulta: 2014-1-10] Disponible en: http://www.unitronics-electric.com/pdf/articulos/mantenimiento_184.pdf
- [17] BURGOS, J. C., *Transformadores, Apuntes y prácticas de la asignatura Circuitos Magnéticos y Transformadores*, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [18] CIRUJANO, P., *Descargas Parciales en Transformadores sumergidos en Aceite*, Trabajo fin de Máster en Ingeniería Eléctrica Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Julio de 2012.
- [19] REIS, P., *Análisis del envejecimiento del aceite de un transformador mediante espectroscopia dieléctrica medida en baja frecuencia*, Proyecto fin de carrera de Ing. Tec. Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid.
- [20] OKABE, S., *Partial Discharge induced Degradation Characteristics of Oil-impregnated Insulating Material Used in Oil-immersed Power Transformers*, Agosto de 2010. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [Base de datos en línea] [Consulta: 2013-12-20] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5539694> (iee2)
- [21] KHAWAJA, R. H., BLACBURN, T. R., *Partial Discharge Patterns in Oil-Impregnated Paper and Pressboard Insulation at High Temperature*, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08). . En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [Base de datos en línea] [Consulta: 2013-11-24] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4812977>
- [22] MARTÍN, R., “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, Cigre: Grupo de trabajo: A2-35, Octubre de 2010.
- [23] SUWANO, H., *Model and Computer Simulation of Partial Discharge Patterns in Natural Liquid Insulation for High Voltage Application*, nº: 5 volumen: 5, 2011.
- [24] EBERHARDT, R., MUHR, H. M., LICK, W., WIESER, B., *Partial discharge behaviour of an alternative insulating liquid compared to mineral oil*. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [base de datos en línea] [consulta: 2014-1-8] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5549776>
- [25] VÁZQUEZ, A., *BIOTEMP®: Aislante eléctrico en base a aceites vegetales para uso en transformadores de potencia; una solución ecológica y segura*. [base de datos en línea] [consulta: 2013-11-8] Disponible en:
[http://www02.abb.com/db/db0020/db002013.nsf/0/90a46f9cac883848c12576f7006d51b1/\\$file/Art%C3%ADculo+1%C3%A9nico+-+Electromagazine+No+36.pdf](http://www02.abb.com/db/db0020/db002013.nsf/0/90a46f9cac883848c12576f7006d51b1/$file/Art%C3%ADculo+1%C3%A9nico+-+Electromagazine+No+36.pdf)
- [26] RAJAB, A., UMAR, K., KOZAKO, M., OHTSUKA, S., HIKITA, M., “Partial Discharge Phase Distribution of Palm Oil as Insulating Liquid”, Abril de 2011.
- [27] BLACKBURN, T., BUNDIN, K., FINLAY, B., ISLAM, S., MACPHERSON, L., *Australian experience with the development, ageing and maintenance of vegetable-based insulating oils*, 2006.
- [28] KARMAKAR, S., ROY, N. K., KUMBHAKAR, P., *Partial Discharge Measurement of Transformer with ICT Facilities*, 2009. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic

Engineers) [base de datos en línea] [consulta: 2013-12-20] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=798922&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D798922>

[29] MANNHEIMER, W. A., RIPPER, A.P., *On the Use of Acoustic Signals for Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers*, 2010. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [base de datos en línea] [consulta: 2014-1-8] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=845502>

[30] ROGIER, A., MORSHUIS, P., MEIJER, S., SMIT, J., *Identification of Partial Discharge Defects in Transformer Oil*, 2005. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [base de datos en línea] [consulta: 2013-12-8] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1560745>

[31] AGORIS, P., CICHECKI, P., MEIJER, S. SMIT, J., *Building a Transformer Defects Database for UHF Partial Discharge Diagnostics*, 2007. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [base de datos en línea] [consulta: 2013-12-8] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4538637>

[32] FOOL, J.S., GHOSH, P.S., *Artificial Neural Network modelling of Partial Discharge parameters for transformer oil diagnosis*, 2002. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [base de datos en línea] [consulta: 2014-2-10] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1048836>

[33] KHAWAJA, R. H., ARISTANA, W. G., BLACKBURN, T. R., *Investigation of the statistical behavior of PD patterns in oil-impregnated insulation at elevated temperature*. En IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [base de datos en línea] [consulta: 2014-1-15] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6318931>

[34] TORRES PEÑALOZA, D., *Sistema de localización de descargas parciales en línea*”, *COMPLETAR*, Tesis Fin de Máster en Tecnología Avanzada, UPIITA, Febrero de 2010.

[35] PRIETO DUQUE, A., *Caracterización de descargas parciales mediante análisis estadístico de los pulsos en radiofrecuencia*, Trabajo fin de Grado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, Septiembre de 2013.

[36] Task Force [13] *Partial Discharges in Transformer Insulation*, 2000.